



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Medida de características acústicas de la sala 3 de Kinépolis Madrid

AUTOR: Adrián Sánchez Jiménez

TITULACIÓN: Grado en ingeniería de sonido e imagen

TUTOR (o Director en su caso): Juan José Gómez Alfageme

DEPARTAMENTO: DIAC

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Emma Acosta Menéndez

VOCAL: Juan José Gómez Alfageme

SECRETARIO: Francisco Aznar Ballesta

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario,

MEDIDA DE CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LA SALA 3 DE KINÉPOLIS MADRID

Adrián Sánchez Jiménez

Resumen

Kinépolis Madrid es uno de los mayores complejos cinematográficos del mundo contando incluso con records Guinness como el del complejo cinematográfico con mayor número de butacas del mundo. Está compuesto por 25 salas con capacidades entre 220 y 996 espectadores. Todas estas salas están equipadas con las últimas tecnologías de sonido e imagen y están adecuadamente acondicionadas para que las características acústicas de las mismas sean óptimas; no obstante, en el complejo no disponen de información sobre estas características.

El presente PFG tratará de medir algunos de estos parámetros acústicos como la claridad, la definición o la inteligibilidad de la sala, pero se prestará especial atención al tiempo de reverberación de la misma ya que es uno de los parámetros más significativos a la hora de caracterizar acústicamente una sala. En concreto, se trabajará sobre la sala número 3, con capacidad para 327 espectadores, lo que la convierte en una de las salas de medio tamaño del recinto.

Por otro lado, además de medir las características acústicas de la sala, se medirán las dimensiones de la misma para, posteriormente, construir dos modelos virtuales de la misma. Uno de ellos será un modelo detallado, mientras que el otro será más simple. A partir de estos modelos, se realizarán simulaciones para obtener los mismos parámetros medidos en la sala real.

Una vez se obtengan los parámetros acústicos de ambas maneras, se compararán las medidas entre sí, estudiando si las diferencias entre los medidos y los simulados superan ciertos umbrales que estimarán si los modelos creados por ordenador realmente pueden representar a la sala real, o no.

Por último, se obtendrán conclusiones para saber cuál de los dos modelos creados se acerca más a las medidas reales, cómo realizar las simulaciones, qué tipos de señal utilizar en las medidas y qué parámetros tener en cuenta, para así facilitar el trabajo en futuras experiencias ahorrando tiempo.

Abstract

Kinepolis Madrid is one of the largest cinema complexes in the world, having won even a Guinness as the cinema complex with more seats in the world. It consists of 25 cinemas whose capacities are between 220 and 996 people. All these cinemas are fully equipped with the latest audio and video technologies and are appropriately conditioned for the optimal acoustic characteristics; nevertheless, the resort does not have information on these features.

This PFG's aim, is trying to measure some acoustic parameters such as clarity, definition or intelligibility of the room, but paying special attention to the reverberation time since, it is one of the most significant acoustic parameters to characterize a room. In particular, the study will be developed at the cinema number 3 with capacity for 327 spectators, which turns it into one of the rooms of average size of the enclosure.

In addition to measuring the acoustic characteristics of the room, the dimensions of it will be also measured, to then build two virtual models of it. One will be a detailed model, while the other one, will be much simpler. After that, simulations from those models will be performed in order to obtain the same data measured at the real room.

Once the acoustic parameters had been obtained in both ways, there will be a comparison of all the measures together, studying whether differences between the real measured data and simulated ones exceed an estimated limit. This comparison, will give information about whether the computer models created can really represent the real room or not.

Finally, conclusions to know which of the two created models is more appropriate to use, how to perform the simulations, what types of signal should be used in the measurements and which parameters to take into account in order to facilitate and saving time in future experiences, will be drawn.

Índice

Resumen	- 1 -
Abstract	- 2 -
Índice de figuras	- 5 -
Índice de ecuaciones	- 8 -
Capítulo 0: Introducción	- 9 -
Capítulo 1: Parámetros acústicos	- 12 -
1. RT	- 13 -
1.1. T30	- 14 -
1.2. T20	- 14 -
1.3. T10	- 14 -
2. EDT	- 15 -
3. Ts	- 16 -
4. Claridad	- 16 -
4.1. Claridad musical (C80)	- 17 -
4.2. Claridad de la voz (C50)	- 17 -
5. D50	- 18 -
6. %Alcons	- 19 -
7. STI	- 20 -
7.1. RaSTI	- 21 -
Capítulo 2: Medición <i>in-situ</i>	- 22 -
1. La sala	- 23 -
2. Equipo de medición	- 24 -
2.1. DIRAC 4.0	- 24 -
2.2. Micrófonos	- 24 -
2.3. Fuente	- 25 -
2.4. Amplificador	- 27 -
2.5. Sonómetro	- 27 -
2.6. Tarjeta de sonido	- 27 -
2.7. Otros elementos	- 27 -
3. Calibración	- 28 -
4. Medición	- 28 -
4.1. Montaje	- 29 -
4.2. Configuración del sistema de medida	- 30 -
4.3. Elección de las posiciones de medida	- 31 -

4.4. Toma de datos.....	- 32 -
5. Resultados	- 34 -
Capítulo 3: Modelo virtual de la sala	- 37 -
1. Creación de la sala.....	- 38 -
2. Materiales	- 41 -
3. Simplificación de la sala	- 48 -
4. Simulación.....	- 50 -
Capítulo 4: Validación del modelo.....	- 58 -
1. T30.....	- 60 -
2. EDT	- 63 -
3. Ts	- 65 -
4. C80.....	- 67 -
5. D50	- 68 -
6. %Alcons	- 70 -
7. STI.....	- 71 -
7.1. RaSTI.....	- 72 -
Conclusiones y futuras líneas de investigación	- 74 -
Referencias	- 77 -
Bibliografía.....	- 79 -

Índice de figuras

Figura 1: Medida del tiempo de reverberación a partir de la curva de decrecimiento	- 14 -
Figura 2: Tiempos de reverberación en función del uso de la sala	- 15 -
Figura 3: Medida del EDT	- 16 -
Figura 4: Ley de Peutz	- 20 -
Figura 5: escala STI.....	- 21 -
Figura 6: Plano de Kinépolis Madrid	- 23 -
Figura 7: Sala 3 de Kinépolis Madrid	- 24 -
Figura 8: Patrón polar de las cápsulas CK 92 (a) y CK 94 (b)	- 25 -
Figura 9: Fuente DO12 de AVM	- 26 -
Figura 10: Diagrama polar de la fuente DO12 en diferentes bandas de tercio de octava	- 26 -
Figura 11: Montaje para la calibración del sistema DIRAC	- 28 -
Figura 12: Montaje para la toma de medidas	- 29 -
Figura 13: Configuración de la ventana Measure de DIRAC	- 30 -
Figura 14: Ejemplo de INR válido.....	- 33 -
Figura 15: Desviación estándar del T30 y EDT medidos in-situ, en función de la frecuencia	- 34 -
Figura 16: Coeficientes de Chauvenet en función del número de muestras ...	- 35 -
Figura 17: T30 para medidas realizadas utilizando señal de barrido sinusoidal, en tercios de octava (a) y en octavas (b), así como para medidas realizadas con señal MLS en tercios de octava (c) y en octavas (d).....	- 36 -
Figura 18: Vista frontal del modelo en EASE de la sala 3 de Kinépolis Madrid.....	- 40 -
Figura 19: Vista lateral del modelo en EASE de la sala 3 de Kinépolis Madrid.....	- 40 -
Figura 20: Vista general del modelo en EASE de la sala 3 de Kinépolis Madrid.....	- 41 -
Figura 21: Pantalla Optimize RT de EASE tras seleccionar todos los materiales.....	- 43 -
Figura 22: Coeficiente de absorción de las paredes laterales	- 43 -
Figura 23: Coeficiente de absorción de las paredes frontal y trasera	- 44 -
Figura 24: Coeficiente de absorción del suelo.....	- 44 -
Figura 25: Coeficiente de absorción de la zona de butacas	- 45 -
Figura 26: Coeficiente de absorción del techo.....	- 45 -

Figura 27: Coeficiente de absorción de las puertas metálicas	- 46 -
Figura 28: Coeficiente de absorción de las puertas de madera.....	- 46 -
Figura 29: Coeficiente de absorción de las rejillas metálicas	- 47 -
Figura 30: Coeficiente de absorción de la ventana.....	- 47 -
Figura 31: Vista frontal del modelo simplificado de la sala 3 de Kinépolis Madrid	- 48 -
Figura 32: Vista lateral del modelo simplificado de la sala 3 de Kinépolis Madrid	- 49 -
Figura 33: Vista general del modelo simplificado de la sala 3 de Kinépolis Madrid	- 49 -
Figura 34: Detalle de la zona de audiencia del modelo simplificado de la sala	- 49 -
Figura 35: Pantalla Optimize RT de EASE para el modelo simplificado de la sala	- 50 -
Figura 36: Módulo Area Mapping	- 51 -
Figura 37: Nivel directo simulado con la fuente 1 en la sala compleja (a) y en la simple (b).....	- 53 -
Figura 38: Nivel directo simulado con la fuente 2 en la sala compleja (a) y en la simple (b).....	- 54 -
Figura 39: Nivel total simulado con la fuente 1 en la sala compleja (a) y en la simple (b).....	- 54 -
Figura 40: Nivel total simulado con la fuente 2 en la sala compleja (a) y en la simple (b).....	- 55 -
Figura 41: T30 en la sala compleja cuando emite la fuente 2.....	- 56 -
Figura 42: T30 en la sala simplificada cuando emite la fuente 2	- 56 -
Figura 43: T30 medios para la sala real, el modelo virtual complejo y el modelo virtual simplificado	- 57 -
Figura 44: JND para el T30 de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio	- 60 -
Figura 45: JND en las bandas de tercio de octava para el T30 del modelo virtual complejo de la sala	- 61 -
Figura 46: JND para el T30 de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio	- 62 -
Figura 47: JND en las bandas de tercio de octava para el T30 del modelo virtual simple de la sala	- 63 -
Figura 48: JND para el EDT de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio	- 64 -
Figura 49: JND para el EDT de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio	- 64 -

Figura 50: JND para el Ts de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio	- 65 -
Figura 51: JND para el Ts de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio	- 66 -
Figura 52: JND para el Ts de las medidas de la simulación simple punto a punto y frecuencia a frecuencia.....	- 67 -
Figura 53: JND para el C80 de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio	- 67 -
Figura 54: JND para el C80 de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio	- 68 -
Figura 55: JND para el D50 de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio	- 69 -
Figura 56: JND para el D50 de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio	- 69 -
Figura 57: Alcons medido en cada una de las posiciones del modelo complejo de la sala.....	- 70 -
Figura 58: Alcons medido en cada una de las posiciones del modelo simplificado de la sala.....	- 71 -
Figura 59: STI medido en cada una de las posiciones del modelo complejo de la sala	- 72 -
Figura 60: STI medido en cada una de las posiciones del modelo complejo de la sala	- 72 -
Figura 61: Comparación entre los STI y los RaSTI medios para ambos modelos.....	- 73 -

Índice de ecuaciones

[Ec. 1].....	- 13 -
[Ec. 2].....	- 16 -
[Ec. 3].....	- 17 -
[Ec. 4].....	- 17 -
[Ec. 5].....	- 17 -
[Ec. 6].....	- 18 -
[Ec. 7].....	- 18 -
[Ec. 8].....	- 19 -
[Ec. 9].....	- 21 -
[Ec. 10].....	- 35 -
[Ec. 11].....	- 35 -
[Ec. 12].....	- 59 -

Capítulo 0: Introducción

A la hora de proyectar una nueva sala cinematográfica, su diseño acústico es muy importante ya que, de este dependen las características acústicas que adquirirá la sala y la inteligibilidad de un mensaje en la misma. No obstante, en la mayoría de ocasiones este diseño realizado durante la construcción, no se conserva por lo que con el tiempo, no se dispone de información acústica de las salas de cine.

Este es el caso de Kinépolis Madrid, un complejo cinematográfico situado entre los mayores y más punteros del mundo, que sin embargo, no dispone de información acústicas sobre sus salas. Por ello, se decide realizar una serie de proyectos que proporcionarán dicha información. En concreto, el presente proyecto se realiza sobre la sala 3 del complejo la cual cuenta con varias salas “gemelas” distribuidas por el complejo, las número 4, 9, 10, 15, 16, 21 y 22, por lo que los datos y conclusiones obtenidas para la sala 3 muy probablemente podrán aplicarse a estas las cuales tienen la misma capacidad, muy similares dimensiones, mismo tamaño de pantalla y misma distancia entre la pantalla y el proyector.

Además, se aprovechan las medidas realizadas para abordar un estudio con los siguientes objetivos principales:

- Determinar la mejor manera de tomar datos en una sala.
- Analizar los parámetros acústicos de una sala de cine.
- Aprender a diseñar modelos virtuales de recintos.
- Validar dichos modelos.
- Concluir cuál es la mejor forma de realizar simulaciones con los modelos creados.

La estructura de este proyecto está dividida en cuatro grandes capítulos además de un apartado de conclusiones y la presente introducción

En el primero de ellos, se definen todos los parámetros acústicos que serán de utilidad a lo largo del proyecto, proporcionando las ecuaciones necesarias para calcularlos y algunas gráficas que ayuden a su comprensión.

En el segundo capítulo, se abordan las medidas realizadas in-situ. Para ello, se describe en primer lugar el equipo necesario para medir, cómo utilizarlo y la manera de llevar a cabo las medidas. Asimismo, se exponen algunos resultados que pueden resultar de interés.

El tercer capítulo, está dedicado a la simulación virtual de la sala. Se explica cómo realizar el modelo de la sala utilizando el programa EASE 4.3. También se afronta la elección de materiales para la sala diseñada, de

manera que tenga las mismas características acústicas que la sala real. A continuación, se realiza un modelo simplificado de la sala y se comprueba si puede utilizarse en lugar del realizado en inicialmente el cual era más detallado. Por último, se exponen algunos resultados obtenidos al simular en ambos modelos las mismas medidas que se tomaron en la sala real.

El último capítulo se encarga de la validación de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones creadas anteriormente. Para ello, se estudiarán todos los parámetros definidos en el primer capítulo calculando la mínima diferencia que el oído humano es capaz de percibir entre dos sonidos distintos. Con esto, se concluirán qué parámetros son los más adecuados a la hora de validar los modelos virtuales.

Capítulo 1: Parámetros acústicos

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el objetivo del proyecto es obtener los parámetros acústicos de la sala de estudio, para posteriormente, poder realizar un estudio de la misma.

Existen multitud de estos parámetros, pero en este caso sólo nos serán de utilidad los siguientes: el tiempo de reverberación, el tiempo de reverberación inicial, el tiempo central, la claridad, la definición, el Alcons y el STI. A continuación se detallan las principales características de cada uno de estos parámetros.

1. RT

El tiempo de reverberación (RT) es uno de los principales parámetros que expresan la calidad acústica de una sala. Se define como el tiempo comprendido entre el cese de emisión de una fuente y el fin de sus reflexiones. También se define como el tiempo que tarda en decaer la energía acústica de una sala a una millonésima parte de su valor inicial, tal como definió Sabine, siendo esta una de las definiciones más simples y usadas. Se mide en segundos y expresa la “viveza” de la sala (a más RT mayor viveza). Este parámetro está ligado a las características físicas de la sala ya que depende directamente de su volumen y superficie así como de los materiales con los que está construida. Conociendo estos datos se puede calcular utilizando la ecuación (1):

$$RT = \frac{0.161V}{S \alpha} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Siendo:

V= volumen de la sala en m³.

S= superficie de la sala en m².

α= coeficiente de absorción total de la sala expresado en Sabines.

También se puede medir a partir de la curva de decrecimiento de la energía acústica media, considerando que el RT es el tiempo que tarda en decaer la energía acústica media en el recinto 60 dB una vez que la fuente ha parado de emitir. Usualmente esta caída empieza a considerarse una vez han decaído 5 dB para así evitar el régimen estacionario, por tanto el rango que se corresponde al RT es el de -5 dB hasta -65 dB. En la figura 1 aparece una explicación visual de lo explicado en este párrafo.

En ocasiones el recinto cuya reverberación se desea conocer no tiene unas condiciones adecuadas para medir una caída de nivel tan grande, entre otras causas por la presencia de ruido de fondo; por tanto se cogen intervalos más pequeños, por lo que surgen el T30, que es el que será utilizado en este proyecto, el T20 y el T10.

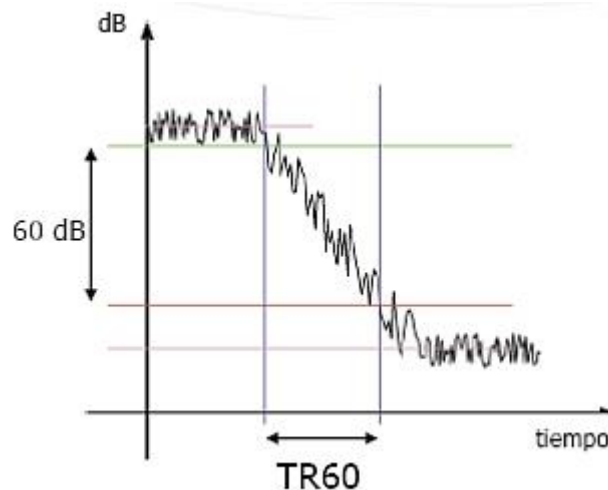


Figura 1: Medida del tiempo de reverberación a partir de la curva de decaimiento [1]

1.1. T30

El T30 es el tiempo de reverberación en función de un rango de evaluación de 30 dB, es decir, no es más que la medida del tiempo de reverberación en un rango reducido.

En este caso, el rango de medida en la curva de decaimiento es el correspondiente una caída de -5 a -35 dB. Posteriormente si se desea conocer el RT, basta con extrapolar el tiempo de decaimiento a 60 dB, multiplicando por 2.

1.2. T20

Es paralelo al T30 pero considerando un intervalo aún menor, de -5 a -25 dB. En este caso, si se desea conocer el RT habría que extrapolar multiplicando por 3.

1.3. T10

Del mismo modo que el T20, el T10 es paralelo al T30 pero considerando un intervalo aún menor si cabe, de -5 a -15 dB. En este caso, si se desea conocer el RT habría que extrapolar multiplicando por 6.

Como se ha comentado, el tiempo de reverberación depende de las características físicas de la sala y por eso mismo se pueden establecer una serie de tiempos de reverberación comunes en función del uso que se le vaya a dar a la sala tal y como se recoge en la figura 2 donde todos los tiempos están dados en segundos:

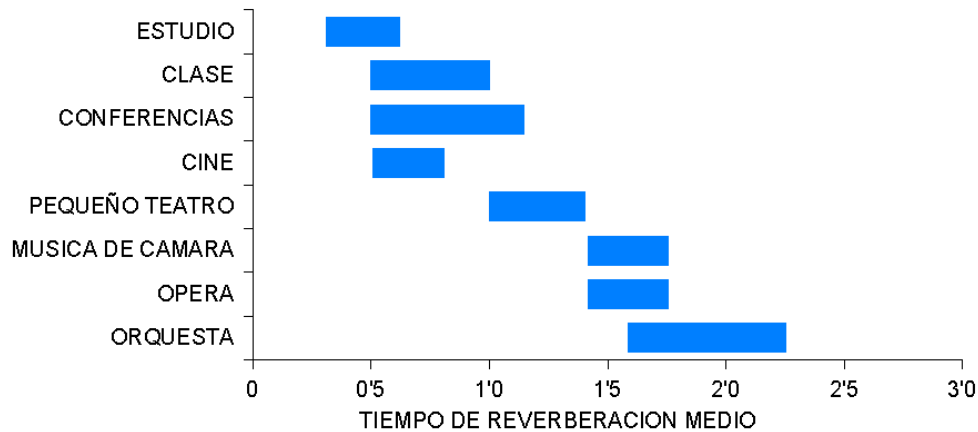


Figura 2: Tiempos de reverberación en función del uso de la sala [2]

Por tanto, en el caso concreto de la sala estudiada debería cumplirse que el tiempo de reverberación medio esté comprendido en el rango de 0.5 a 0.8 segundos aproximadamente. No obstante, aunque estos son los tiempos considerados óptimos, también dependerán del volumen de la sala del cine.

2. EDT

El tiempo de reverberación inicial (EDT, siglas correspondientes a *Early Decay Time*), se corresponde con el tiempo que tarda en caer el nivel 10 dB en la curva de decrecimiento una vez la fuente ha cesado su emisión, multiplicado por 6. Como se observa en la figura 3, gráficamente se obtiene uniendo con una recta el punto donde la fuente deja de emitir con el punto donde el nivel cae 10 dB.

Se utiliza para obtener el tiempo de reverberación que percibimos subjetivamente, mientras que el RT es un parámetro objetivo. Precisamente por esta razón, el EDT suele ser menor al RT, aunque en salas con mucha difusión del sonido sus valores pueden coincidir. Un valor del EDT menor que el RT significa que la “viveza” de la sala comentada anteriormente es menor que la esperada debido al valor del RT.

Es aconsejable que para las bandas de frecuencia de 500 y 1000 Hz el EDT y el RT tengan valores similares en salas vacías.

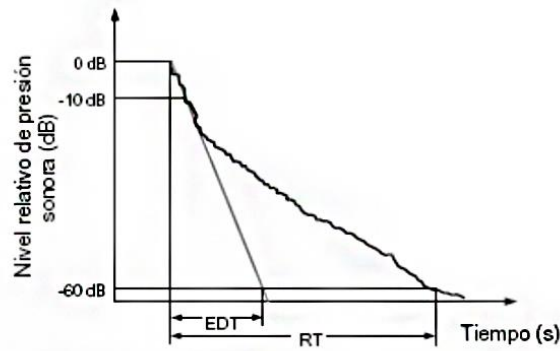


Figura 3: Medida del EDT [3]

3. Ts

El tiempo central (Ts), es un parámetro escasamente utilizado que se utiliza para determinar la nitidez del sonido de manera que un aumento del tiempo central en un punto implica un aumento de la nitidez percibida en ese punto, no obstante, el valor del tiempo central no debería superar los 2 segundos ya que, en ese caso, la nitidez del sonido disminuye.

Este parámetro también es denominado centro de gravedad debido a que mide el tiempo que transcurre desde el inicio hasta el centro de gravedad de la curva de decrecimiento.

Küer lo definió como el primer momento del área que queda debajo de la curva energía-tiempo, apoyando esta teoría con la ecuación (2):

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} [dB] \quad [\text{Ec. 2}]$$

4. Claridad

La claridad es la relación entre la energía acústica precoz y la tardía y expresa la distribución temporal de la energía [4]. Para determinarla en un recinto, se definen dos parámetros en función del uso que se le vaya a dar a dicho recinto:

4.1. Claridad musical (C80)

Se utiliza para salas dedicadas a la música e indica el grado de separación que tienen los sonidos en una composición. Se calcula como la relación entre la energía sonora presente durante los 80 ms posteriores a la llegada del sonido y el resto de la energía, utilizando la ecuación (3):

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_{0.08}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad [\text{Ec. 3}]$$

Como se observa la integral presente en el numerador de la fracción de la anterior ecuación, actúa en un rango comprendido entre $t=0$ y $t=80\text{ms}$, por lo que el sonido directo ($t=0$) también se incluye al medir este parámetro.

En ocasiones, se utiliza un valor típico para estudiar la claridad llamado *Music Average*, el cual está determinado por las bandas de frecuencia de 500, 1000 y 2000 Hz mediante la ecuación (4):

$$C_{80}(\text{music average}) = \frac{C_{80}(500\text{Hz}) + C_{80}(1\text{kHz}) + C_{80}(2\text{kHz})}{3} [dB] \quad [\text{Ec. 4}]$$

Este valor debe estar entre -4 y 0 dB según Beranek para una sala vacía, y entre -2 y 2 dB para salas ocupadas según L. G. Marshall.

En el caso del presente proyecto, el C80 será el parámetro utilizado para estudiar la claridad de la sala debido al uso que se le da a la misma, ya que al incluir usos musicales es necesario que en el intervalo de medida escogido haya el tiempo necesario para recoger todas las reflexiones iniciales que recoge el oído humano.

4.2. Claridad de la voz (C50)

Se utiliza para salas dedicadas a la palabra y se calcula de la misma manera que el C80 pero considerando solo los 50 primeros milisegundos posteriores a la llegada del sonido utilizando la ecuación (5) presentada a continuación:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad [\text{Ec. 5}]$$

Al igual que en el caso anterior, también hay un valor típico utilizado para evaluar el C_{50} de una sala de una manera más cómoda. Se le denomina *Speech Average* y está determinado por las bandas de frecuencia de 500, 1000, 2000 y 4000 Hz mediante la ecuación (6):

$$\begin{aligned} C_{50}(\text{speech average}) \\ = 0.15 \cdot C_{50}(500\text{Hz}) + 0.25 \cdot C_{50}(1\text{kHz}) + 0.35 \\ \cdot C_{50}(2\text{kHz}) + 0.25 \cdot C_{50}(4\text{kHz}) \text{ [dB]} \end{aligned} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Este valor fue definido por L. G. Marshall en función de la participación que tiene cada banda de frecuencia en la inteligibilidad de la palabra estableciendo que para una correcta inteligibilidad el valor debe superar los 2 dB.

Finalmente, conviene destacar que la claridad no es un parámetro independiente y que varía con el tiempo de reverberación de manera que, si el RT aumenta, la claridad disminuye.

5. D50

La definición (D50) o *Deutlichkeit* se define como la relación entre la energía sonora presente durante los 50 ms posteriores a la llegada del sonido y la totalidad de la energía, utilizando la ecuación (7), siendo común expresar su resultado en porcentaje debido a que es un valor que fluctúa entre 0 y 1:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Normalmente solo se utiliza en salas dedicadas a la palabra y aunque este proyecto tenga por finalidad la medida de características de una sala de cine, se tendrá en cuenta este parámetro ya que a la sala se le puede dar otros usos.

Su valor debe ser lo más uniforme posible cuando la sala esté ocupada y además para cada banda de frecuencia conviene que supere el 50%, ya que valores inferiores supondrán una baja inteligibilidad de la palabra.

Es importante destacar que la definición es un parámetro íntimamente relacionado con la claridad de la voz, por lo que basta con

conocer uno de los dos parámetros. Esta relación está expresada mediante la ecuación (8):

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) [dB] \quad [\text{Ec. 8}]$$

Su valor depende directamente de la posición de medida ya que cuanto más lejos se coloque el receptor de la fuente, habrá más campo reverberante y, por tanto, habrá menor parte de la energía que se corresponda con las primeras reflexiones que son las consideradas en el numerador de la ecuación (7), lo que se traducirá en una disminución de la definición.

Además, en casos en que la fuente sea una persona, la definición en puntos situados a la misma distancia de la fuente será mayor en aquellos situados frente a la fuente. Esto se debe a las características directivas de la voz humana.

6. %Alcons

El Alcons o *Percentage Articulation Loss of Consonants* es uno de los denominados parámetros de inteligibilidad y como su propio nombre indica da información sobre el porcentaje consonantes que los oyentes no consiguen entender en una sala, por tanto, interesa que su valor sea lo más pequeño posible.

Lógicamente, es un parámetro subjetivo ya que no todo el mundo percibirá la misma sensación en una misma sala por lo que, en el momento de definir este parámetro, se consensuaron unos valores medios. Aquí surge el primer problema que tiene el Alcons, y es que no es inequívoco; el segundo problema que presenta es que solo se especifica para la banda de tercio de octava centrada en 2 kHz por lo que su uso para verificar la calidad del sonido en una sala queda bastante limitado. Un último problema que presenta, es el hecho de obviar factores como el ruido de fondo, la distorsión o la respuesta en frecuencia de la sala, factores todos ellos que pueden afectar a la inteligibilidad.

Originalmente, este parámetro fue definido por el científico holandés V.M.A. Peutz, a partir de escuchas realizadas por distintos sujetos y analizando la percepción del sonido que tenía cada sujeto. Posteriormente, y

como se ha mencionado anteriormente, se buscaron los valores medios para que, a partir de cálculos estadísticos, poder obtener una relación con el tiempo de reverberación y la diferencia entre los niveles de presión sonora en campo directo y reverberante. Esta relación finalmente quedaría representada en la gráfica mostrada en la figura 4:

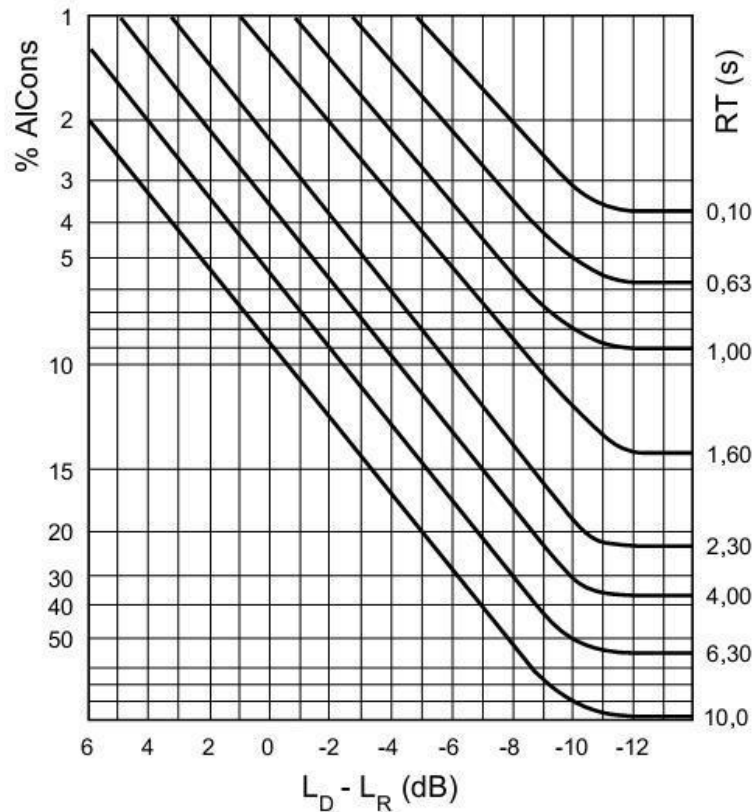


Figura 4: Ley de Peutz [5]

Como se ha comentado, cuanto mayor sea el Alcons, menos será la inteligibilidad de la sala. Por ello, se ha establecido un baremo dando por buenos o muy buenos los resultados por debajo de un 10 %, aceptables resultados de hasta un 15 %, malos resultados con un valor de hasta el 18% e inaceptable cualquier valor superior al 18 % de Alcons.

7. STI

El STI, al igual que el Alcons, es un parámetro de inteligibilidad de la palabra cuyo acrónimo significa *Speech Transmission Index*, es decir, índice de transmisión del discurso. La principal diferencia respecto al Alcons es que el STI es un parámetro objetivo que depende del ruido de fondo, del tiempo de reverberación y, en general, de las características de la sala. Esta

diferencia tiene como consecuencia directa que el STI sea un parámetro cuyo cálculo es bastante complejo, siendo necesarias varias señales moduladas para realizar el mismo.

Fue desarrollado en la década de los setenta por Houtgast y Steeneken estableciendo una escala del 0 al 1 según la cual cuanto más alto sea el valor del STI, mejor será la inteligibilidad en la sala. En la figura 5 puede observarse el detalle de la escala STI.

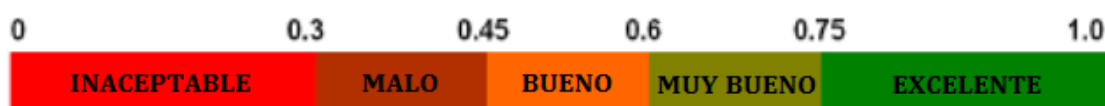


Figura 5: escala STI

7.1. *RaSTI*

El RaSTI o *Rapid Speech Transmission Index* es una versión simplificada del STI que consigue que su cálculo sea más sencillo y rápido. Esto se consigue reduciendo el número de señales moduladas que se utilizan en su cálculo y teniendo en cuenta solo las bandas de octava de 500 y 2000 Hz.

La escala de valores que arroja este parámetro lógicamente es la misma que la del STI, solo que será menos fiable debido a que no deja de ser una aproximación.

El RaSTI además tiene una gran ventaja, y es que puede calcularse de manera sencilla a partir del Alcons, utilizando la ecuación (9):

$$RaSTI = 0.9482 - 0.1845 \ln Alcons[\%] \quad [Ec. 9]$$

Capítulo 2: Medición *in-situ*

En este capítulo se describirá el proceso que se ha llevado a cabo durante la toma de datos en la sala. Además, se obtendrán los primeros resultados arrojados por los equipos de medida.

1. La sala

La sala de estudio será la número 3 del complejo cinematográfico Kinépolis Madrid. Se encuentra situada en el ala derecha del complejo teniendo otra sala similar a uno de sus lados, un pasillo de acceso a otras salas al otro lado, el exterior tras su pantalla y el hall del complejo y pasillos de servicio pegando al lado de su parte posterior. En la figura 6 se puede ver con detalle esta distribución.



Figura 6: Plano de Kinépolis Madrid [6]

Su pantalla tiene un tamaño de 7×17 metros, estando esta separada del proyector por 30.2 metros, lo que hace que dentro del complejo sea una de las salas de tamaño medio. [7]

La sala está compuesta por 17 filas, siendo la capacidad máxima de espectadores sentados en butaca de 327. Adicionalmente, la primera fila dispone de una zona para espectadores en silla de ruedas, por lo que esta capacidad máxima podría verse incrementada ligeramente. Las butacas están distribuidas en tres bloques, separados entre ellos por pasillos de escaleras. El bloque izquierdo (tomando como referencia la vista desde la pantalla) tiene 4 butacas en cada fila, el bloque central tiene una media de 13 butacas por fila y el bloque derecho, el cual solo tiene 8 filas debido a que el resto de espacio está ocupado por el pasillo de entrada a la sala, tiene 4 butacas por fila. En la figura 7 puede observarse una fotografía de la sala que se va a estudiar.

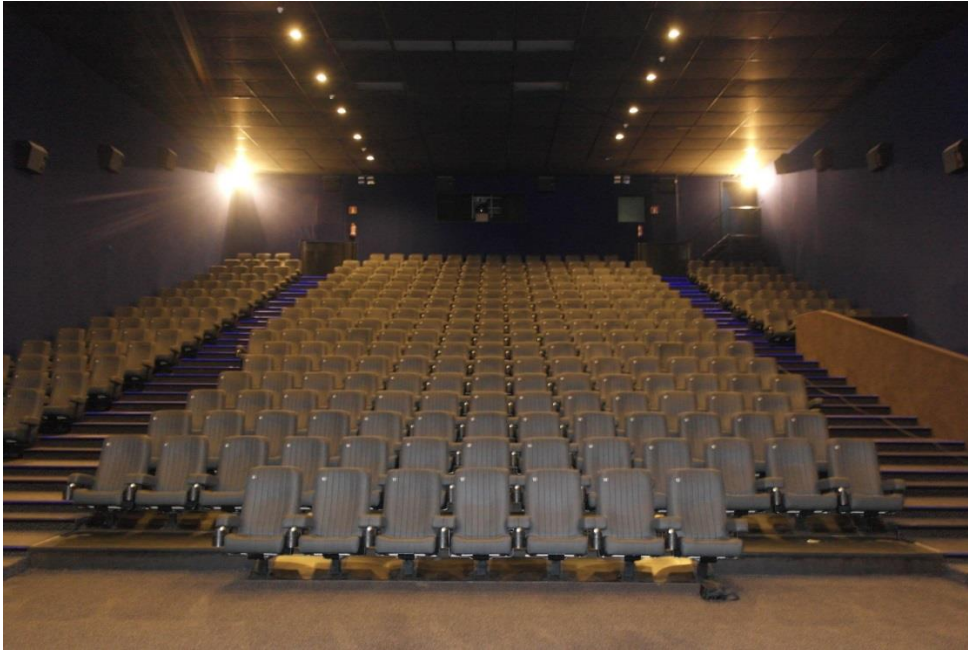


Figura 7: Sala 3 de Kinépolis Madrid

2. Equipo de medición

Para llevar a cabo todas las medidas necesarias para la obtención de los parámetros acústicos de la sala, serán necesarios varios elementos los cuales están detallados a continuación:

2.1. *DIRAC 4.0*

Dirac Room Acoustics es un software de Brüel & Kjær que permite realizar medidas de respuesta al impulso utilizando un ordenador, un dispositivo de sonido que bien puede ser la propia tarjeta de sonido del ordenador y micrófonos.

A partir de esta respuesta medida, el sistema es capaz de calcular el espectro en frecuencia y muchos parámetros acústicos, entre ellos los que nos serán de interés en este caso todos ellos recogidos en la norma UNE-EN ISO 3382. [8][9]

2.2. *Micrófonos*

Se utilizarán dos cápsulas microfónicas de condensador, una con patrón polar omnidireccional, mostrado en la figura 8.a, y otra, bidireccional, patrón que puede observarse en la figura 8.b. Estas serán los

modelos AKG CK 92 y el AKG CK 94, respectivamente, ambas con una sensibilidad de 10 mV/Pa.

Además, para cada una de las cápsulas, será necesario un preamplificador AKG SE 300B, con la misma sensibilidad que las cápsulas utilizadas.

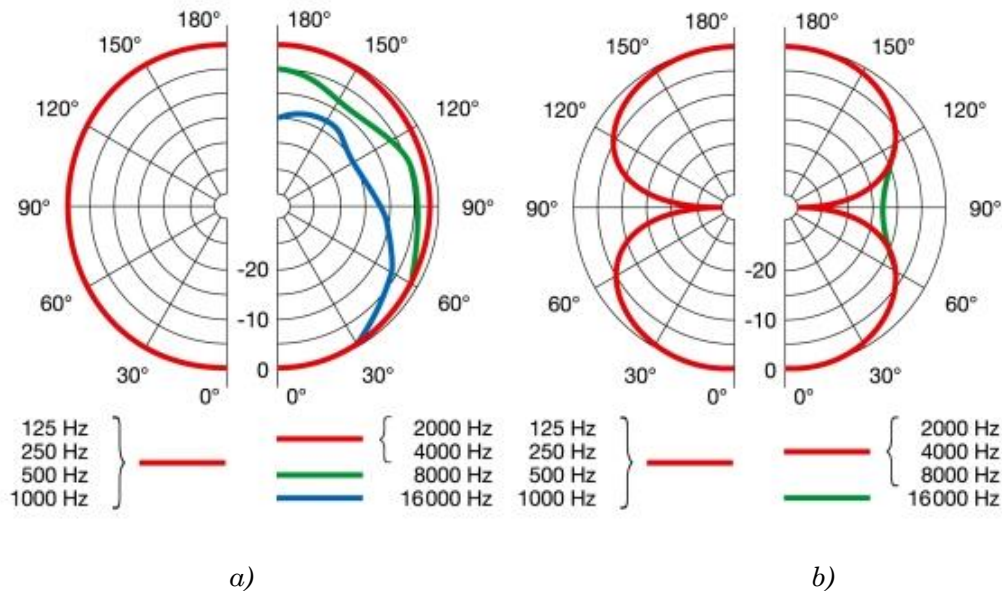


Figura 8: Patrón polar de las cápsulas CK 92 (a) y CK 94 (b) [10]

2.3. Fuente

Para medir las características acústicas de una sala se necesita que la fuente sea lo más omnidireccional posible. Por eso, se ha escogido el modelo DO12 de AVM que, como se muestra en la figura 9, es una fuente cuya caja tiene forma de dodecaedro, teniendo en cada una de sus caras un altavoz. Además dispone de un soporte regulable que permite ajustar la fuente a la posición deseada de manera cómoda, sencilla y sin riesgo de que se mueva.



Figura 9: Fuente DO12 de AVM

Esta fuente está especialmente diseñada para emitir un campo sonoro difuso conforme a la norma UNE-EN ISO 140.

Por último, cabe destacar que la fuente es menos omnidireccional a medida que aumenta la frecuencia, por tanto, habrá que ver si este hecho tiene relevancia en los resultados obtenidos o no. En la figura 10 se aprecia como la fuente se vuelve más direccional al aumentar la frecuencia, pese a que su comportamiento sigue siendo bastante bueno.

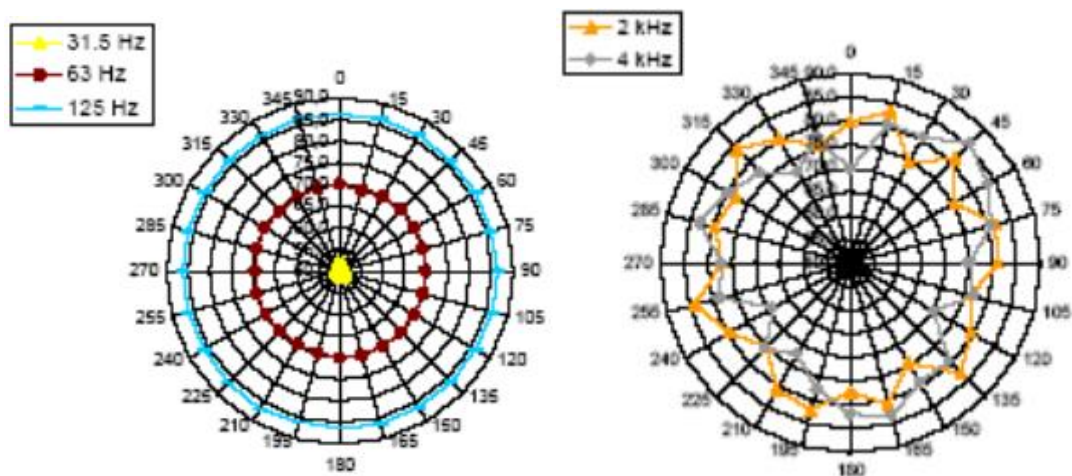


Figura 10: Diagrama polar de la fuente DO12 en diferentes bandas de tercio de octava [11]

2.4. *Amplificador*

Se utilizará un amplificador de potencia de la marca Inter-M; concretamente el modelo M700 el cual consta de dos canales que son suficientes para las medidas a realizar ya que solo hay una fuente que amplificar por lo que con un canal bastará.

2.5. *Sonómetro*

Para poder determinar el ruido de fondo presente en la sala y así tenerlo en cuenta a la hora de hacer las simulaciones por ordenador se utilizará un sonómetro; concretamente será el modelo Investigator 2260 de Brüel & Kjær. [12]

2.6. *Tarjeta de sonido*

Se utilizará el dispositivo USB Audio Interface ZE 0948 de Brüel & Kjær como tarjeta de sonido para evitar la poca precisión que pueda tener la del ordenador. Este dispositivo consta de dos canales de entrada y otros tantos de salida para poder enviar desde el ordenador señales generadas por DIRAC y recibir datos para su estudio a la vez.

Como su propio nombre indica, se conecta al ordenador mediante un USB por lo que no necesita alimentación externa.

2.7. *Otros elementos*

Para poder llevar a cabo todas las mediciones correctamente serán necesarios algunos elementos adicionales que complementen al resto de componentes principales.

Estos serán principalmente soportes para los micrófonos y la fuente, cables y alargaderas con diferentes conectores para conectar todos los elementos entre sí, un medidor láser y una cinta métrica para tomar las dimensiones de la sala y un medidor de condiciones ambientales para medir la temperatura y humedad presente en la sala durante las medidas.

Adicionalmente se utilizará un preamplificador alimentado a pilas para los micrófonos ya que la señal que entregan es muy pequeña. Será el modelo Mix Pre de Sound Devices.

3. Calibración

El primer paso antes de empezar a tomar medidas es calibrar el sistema DIRAC. Para ello debe realizarse el montaje que aparece en la figura 11 que principalmente se basa en conectar el adaptador USB al ordenador uniendo en este cada una de sus entradas con su salida correspondiente.

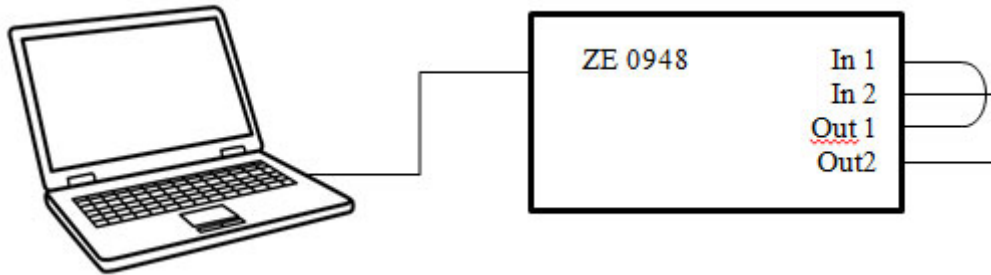


Figura 11: Montaje para la calibración del sistema DIRAC

A continuación, se abre el software DIRAC en el ordenador y en la barra de la parte superior, se escoge la opción *Sound Device Setup* presente en la pestaña *Setup*. Se abrirá una nueva ventana donde habrá que seleccionar como dispositivo tanto de entrada como de salida el *USB Audio CODEC*. También hay que asegurarse de que la opción *Use calibration* no esté seleccionada.

Una vez configuradas todas las opciones como se ha mencionado, se pulsa el botón *Calibration*, aparecerá una ventana donde se da nombre a la calibración que se está realizando y se pulsa *Ok*. El software estará trabajando unos minutos durante los cuales es muy importante no tocar el montaje para que la calibración sea correcta.

Cuando finalice la calibración, ya podrá usarse el sistema para hacer las medidas aunque antes es conveniente comprobar que la calibración ha salido bien haciendo alguna prueba.

4. Medición

Una vez se tengan todos los elementos mencionados anteriormente preparados y el sistema calibrado llega el momento de medir. Para ello lo primero que hay que hacer es cargar en el sistema la calibración realizada

anteriormente abriendo de nuevo la ventana *Sound Device Setup*; en esta ocasión se marca la casilla *Use calibration* y se habilitará un desplegable donde se podrá elegir la calibración deseada. Se pulsa *Ok* y la calibración quedará cargada en el sistema.

4.1. Montaje

Con la calibración cargada, se realiza el montaje representado en la figura 12 y consistente en:

- Conectar la tarjeta USB al ordenador.
- Conectar las entradas de la tarjeta de sonido a las salidas del preamplificador de micrófonos.
- Conectar cada micrófono a una de las entradas del preamplificador microfónico.
- Por otro lado, conectar una de las salidas del dispositivo USB a una de las entradas del amplificador de potencia.
- Por último, conectar el altavoz a la salida del amplificador de potencia correspondiente a la entrada que se ha usado en el paso anterior.

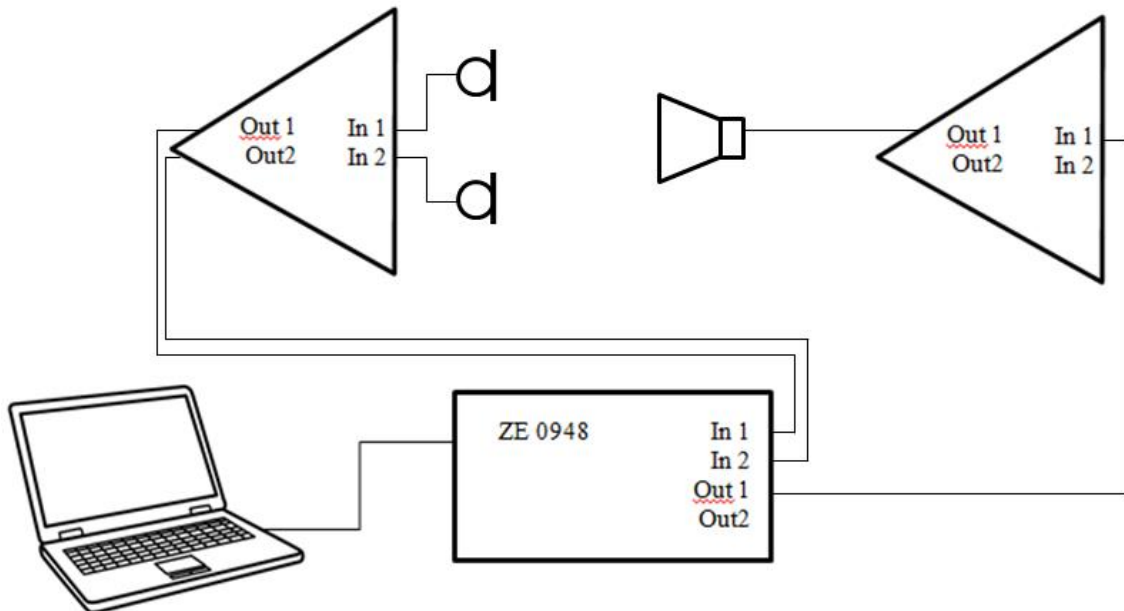


Figura 12: Montaje para la toma de medidas

4.2. Configuración del sistema de medida

Una vez realizado el montaje descrito el sistema debería funcionar correctamente por lo que se puede comenzar el proceso de medición. Para ello, en el menú *File* se escoge la opción *Measure* con lo que se abre la ventana de medidas la cual contiene varias opciones que habrá que configurar. En el apartado *Source* se elegirá la opción *Internal* en *Signal* ya que la señal que se usará para medir será la que produzca el sistema. La longitud *Length* se dejará en 5.46 segundos y en la parte de abajo del apartado *Signal* se escogerá el tipo de señal con que se quiere emitir entre todas las opciones; en nuestro caso para cada posición se harán medidas utilizando la señal *MLS* y la *e-Sweep*.

En el apartado *Type* dentro de la columna *Receiver* se puede escoger la configuración de micrófonos que se va a utilizar. En este caso como se tomarán medidas con un micrófono omnidireccional y otro bidireccional y se disponen de dos canales para poder realizarlas a la vez, se escoge la cuarta opción. El resto de parámetros no hace falta modificarlos.

En la figura 12, se puede observar la pantalla *Measure* de DIRAC con todos los campos que hay que modificar marcados en rojo y las señales que se usarán en las medidas resaltadas en naranja.

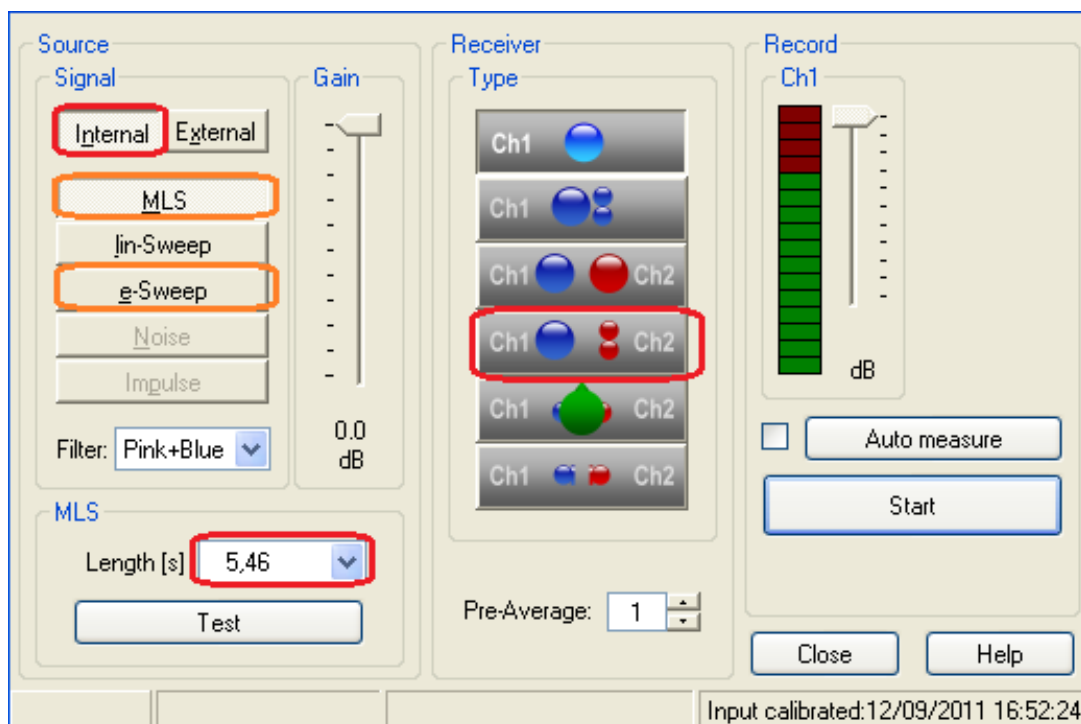


Figura 13: Configuración de la ventana Measure de DIRAC

Con el sistema ya configurado, y antes de medir, hay que ajustar los niveles que se recogen. Para ello, en la ventana *Measure* se pulsa el botón *Test* para emitir una señal de prueba. Con esto, y suponiendo que todos los equipos funcionen correctamente, se pueden obtener tres resultados:

- Si no se emite señal el problema podría ser que alguna conexión no esté bien acoplada o que algún equipo no esté conectado o no tenga pilas, por lo que hay que revisar el montaje para solucionarlo. También el problema podría ser que no se le esté suministrando suficiente ganancia al altavoz mediante el amplificador de potencia.
- Si se emite señal pero no se recibe, el problema podría estar en el preamplificador al que van conectados los micrófonos. Podría haberse quedado sin pilas o en su panel, el conmutador INT-EXT podría no estar en la posición INT que es la correcta. También podría ser que los controles de ganancia de cada uno de los canales estuviesen al mínimo por lo que no amplificarían la señal lo suficiente.
- El último caso posible es que se emita y reciba correctamente, en este caso sólo hay que variar la ganancia de los amplificadores para que la señal recibida no sature y para que se reciba la señal de cada uno de los micrófonos aproximadamente con la misma intensidad.

4.3. *Elección de las posiciones de medida*

Con todo el sistema preparado, tan solo quedan por determinar los puntos en los que se realizará la toma de datos. Para ello, se recurre a la norma UNE-EN ISO 3382-1 [8] donde se especifica como colocar la fuente y los receptores y en cuántos puntos realizar la medida.

En primero lugar la norma especifica que los receptores deben situarse 1.2 metros separados del suelo. Las posiciones en las que se coloquen los micrófonos deben estar separadas entre ellas al menos $\lambda/2$, por lo que se separarán al menos unos 2 metros, y deben estar separadas $\lambda/4$ de cualquier superficie reflectante incluidas paredes y suelo, por en este caso se respetará un límite de 1 metro. En cuanto al número total de posiciones en las que deben realizarse medidas se establece que sea un mínimo de 6. En este caso se tomarán datos en 8 posiciones, distribuidas de manera uniforme y representativa por toda la sala, para tener mayor precisión.

En cuanto a la posición de la fuente sólo se especifica que su centro acústico debe estar separado del suelo 1.5 metros y que deben escogerse al menos dos posiciones teniendo en cuenta que estas sean lo más realísticas posibles, es decir, que representen los puntos donde se situarían las fuentes

sonoras naturales en el recinto. Una de ellas se colocará centrada frente a la pantalla y será denominada fuente 1, y la fuente 2 se colocará a la misma distancia de la pantalla que la primera, pero desplazada hacia un lateral.

En resumen, al combinar las 8 posiciones en las que se colocarán los micrófonos con las 2 posiciones de fuente, se obtendrán un total de 16 combinaciones distintas en las que habrá que tomar datos.

4.4. Toma de datos

Una vez el sistema esté listo y las posiciones de medición escogidas, se pueden empezar a realizar las medidas. Para ello simplemente hay que pulsar sobre el botón *Start* de la ventana *Measure* de DIRAC y esperar a que se haga la medida. Como se deduce de lo comentado anteriormente, hay que realizar este proceso dos veces para cada una de las combinaciones fuente-receptor, una vez con señal *MLS* y la otra con la señal de barrido sinusoidal.

Tras cada medida, se abrirá una ventana de resultados mostrándose la respuesta al impulso emitido que recoge cada uno de los micrófonos, así como la caída que tiene al cesar el impulso. En este punto, hay que comprobar que los datos recogidos son válidos ya que en ocasiones, por ruidos externos o fallos del software, la medida puede contener errores. Para ello se utiliza el *INR* o *Impulse Response to Noise ratio* (relación entre la respuesta impulsiva y el ruido). Desde la ventana principal de DIRAC se escoge la *Grahp* dentro del menú *Parametres*, para posteriormente seleccionar *INR* en el desplegable *Levels*. Con esta acción se abrirá una nueva ventana que mostrará una gráfica con el *INR* de la medida realizada como se observa en la figura 13. En esta gráfica simplemente hay que comprobar que el *INR* sea mayor de 30 dB y que no tenga grandes picos.

Si se cumplen las dos condiciones la medida puede considerarse válida y se pueden guardar los datos pulsando en la ventana de resultados el icono con forma de tabla, el cual abrirá una tabla donde se pueden visualizar los resultados tanto en octavas como en tercios de octava; para cada punto, se guardarán los resultados de ambas maneras en un documento *.txt* que posteriormente podrá abrirse como hoja de cálculo para poder estudiar los datos. Estos resultados contendrán los parámetros definidos en el capítulo 1, además de muchos otros datos, que pese a que se podría haber elegido no medirlos, se han medido por si se decide hacer uso de ellos más adelante.

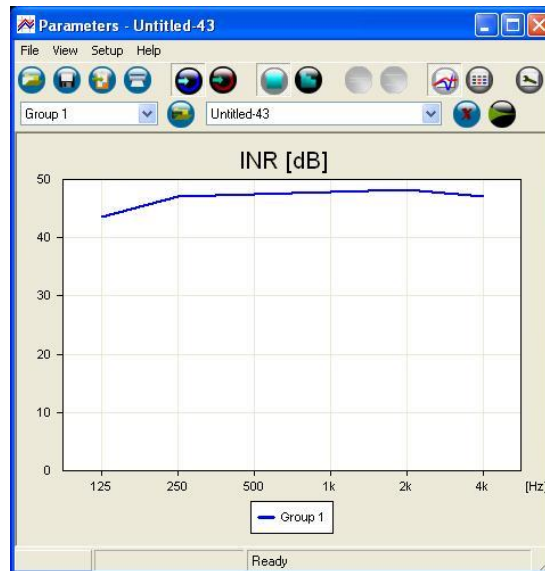


Figura 14: Ejemplo de INR válido

Si no se cumpliesen las dos condiciones para el *INR*, sería necesario repetir la correspondiente medida.

Al realizar la toma de medidas, se consigue que en todas las posiciones el INR supere los 30 dB. No obstante, en el caso de la señal MLS en ocasiones se observan picos extraños en la gráfica por lo que se repiten algunas medidas para conseguir datos decentes. Además, a medida en que las posiciones de medida están más lejos de la fuente, este problema se acentúa y el INR descende hasta acercarse a los 30 dB, problema que no existe en las medidas con la señal de barrido sinusoidal.

Tras realizar las medidas con el DIRAC en cada posición, se medirá el ruido de fondo, con el sistema de climatización encendido, en esas mismas posiciones utilizando el sonómetro. Adicionalmente, se pueden medir las condiciones atmosféricas en la sala como la humedad o la temperatura en varios instantes distintos durante la toma de datos para poder tener un valor promedio y así asegurar que no se ha producido ninguna anomalía en las medidas por estas causas.

Por último, es muy importante medir las dimensiones de la sala utilizando un medidor láser, así como las dimensiones de objetos como rejillas o puertas que puedan intervenir en la manera en que la sala se comporta, para posteriormente poder realizar un modelo virtual de la sala.

5. Resultados

A continuación, se realizará un breve estudio sobre el tiempo de reverberación medido en la sala debido a que es el parámetro más importante. El resto de parámetros mencionados en el capítulo 1 se utilizarán durante la fase de validación del modelo virtual. Además, los archivos originales de resultados obtenidos en las medidas in-situ, se encuentran incluidos en el CD que acompaña este proyecto.

En primer lugar, se calcula la desviación estándar de los dos parámetros definidos en el capítulo 1 que guardan relación con el tiempo de reverberación. En la figura 15, se muestran los resultados de este cálculo. Se aprecia claramente que la desviación del T30 es mucho menor que la del EDT, por lo que será este el parámetro que se utilice a la hora de ajustar el modelo virtual que se creará posteriormente.

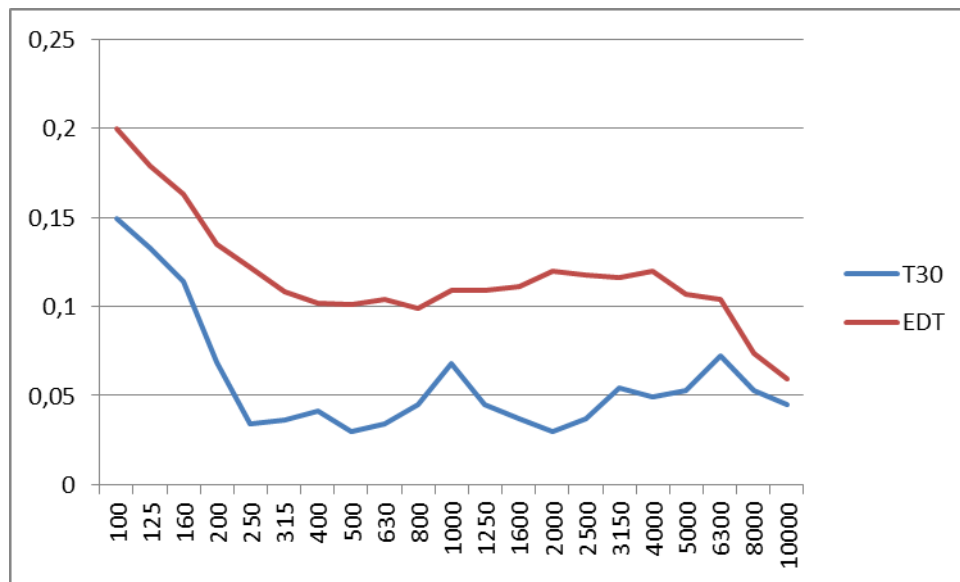


Figura 15: Desviación estándar del T30 y EDT medidos in-situ, en función de la frecuencia

Por tanto, para el estudio del tiempo de reverberación utilizaremos el T30 ya que es el que se recomienda usar en estos casos. A los datos obtenidos, se les aplica el criterio de Chauvenet [13] para evitar datos anómalos. Mediante este criterio se pueden establecer unos valores máximos y mínimos entre los que deben estar las muestras; todas las muestras que no estén en ese rango serán rechazadas. En las ecuaciones 10 y 11 aparece recogida la manera de calcular estos valores.

$$X_{m\acute{a}x} = \bar{X} + k_n \cdot S \quad [\text{Ec. } 10]$$

$$X_{min} = \bar{X} - k_n \cdot S \quad [\text{Ec. } 11]$$

Donde:

\bar{X} = media de las muestras

k_n = coeficiente de Chauvenet

S = desviación estándar

En la figura 16 aparecen recogidos los coeficientes de Chauvenet que varían en función del número de muestras tomadas. Para el caso que nos ocupa, el coeficiente correspondiente a 16 muestras es 2.15.

Además se ha aplicado otro criterio para eliminar datos anómalos y es que por el propio diseño del sistema DIRAC, todos los valores del tiempo de reverberación menor de 0.2 segundos no son fiables por lo que se aproximan a 0.2 s.

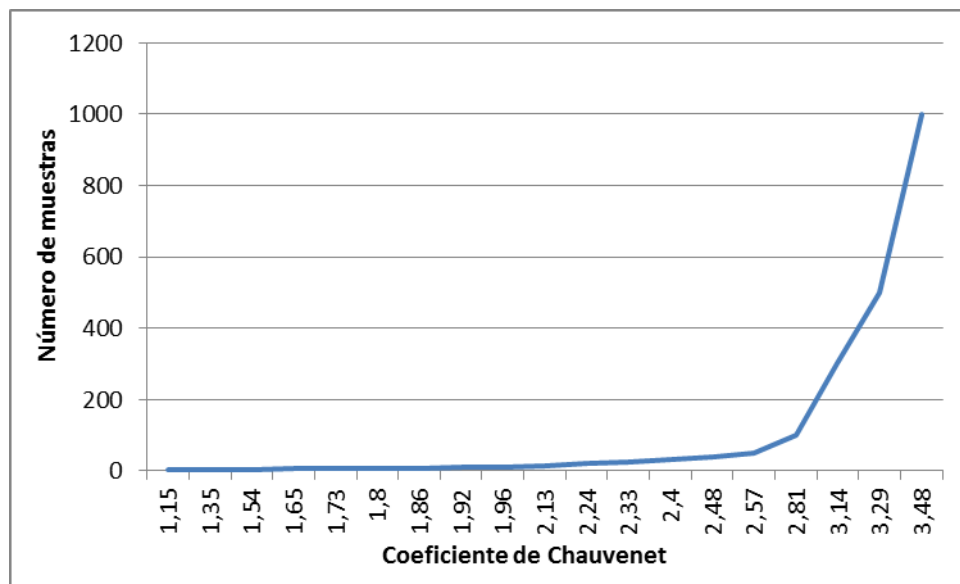


Figura 16: Coeficientes de Chauvenet en función del número de muestras

Este criterio se puede aplicar hasta que no haya ninguna muestra anómala pero en esta ocasión se ha decidido aplicarlo tan solo una vez.

En la figura 17 se muestran las gráficas correspondientes al T30 medido en la sala para cada tipo de señal y expresando los resultados tanto en octavas como en tercio de octava. En todos los casos ya se han eliminado los valores anómalos siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

Observando estos resultados se aprecia que el T30 tiene un valor medio en torno a 0.4 s por lo que el RT será de unos 0.8 s que queda dentro de lo esperado según la figura 2 para una sala de cine. Además, comparando especialmente las figuras 17.a y 17.c todo parece indicar que las medidas realizadas con una señal de tipo MLS son de peor calidad que las realizadas con una señal sinusoidal, ya que a baja frecuencia la figura 17.c presenta demasiados picos que hacen que el RT sea muy variable en esa zona. Este hecho unido a que, como se comentó en el apartado anterior, el INR al validar las medidas realizadas daba bastantes problemas al utilizar este tipo de señal, hacen que se elijan las medidas correspondientes a la señal sinusoidal para validar el modelo de la sala que se va a crear.

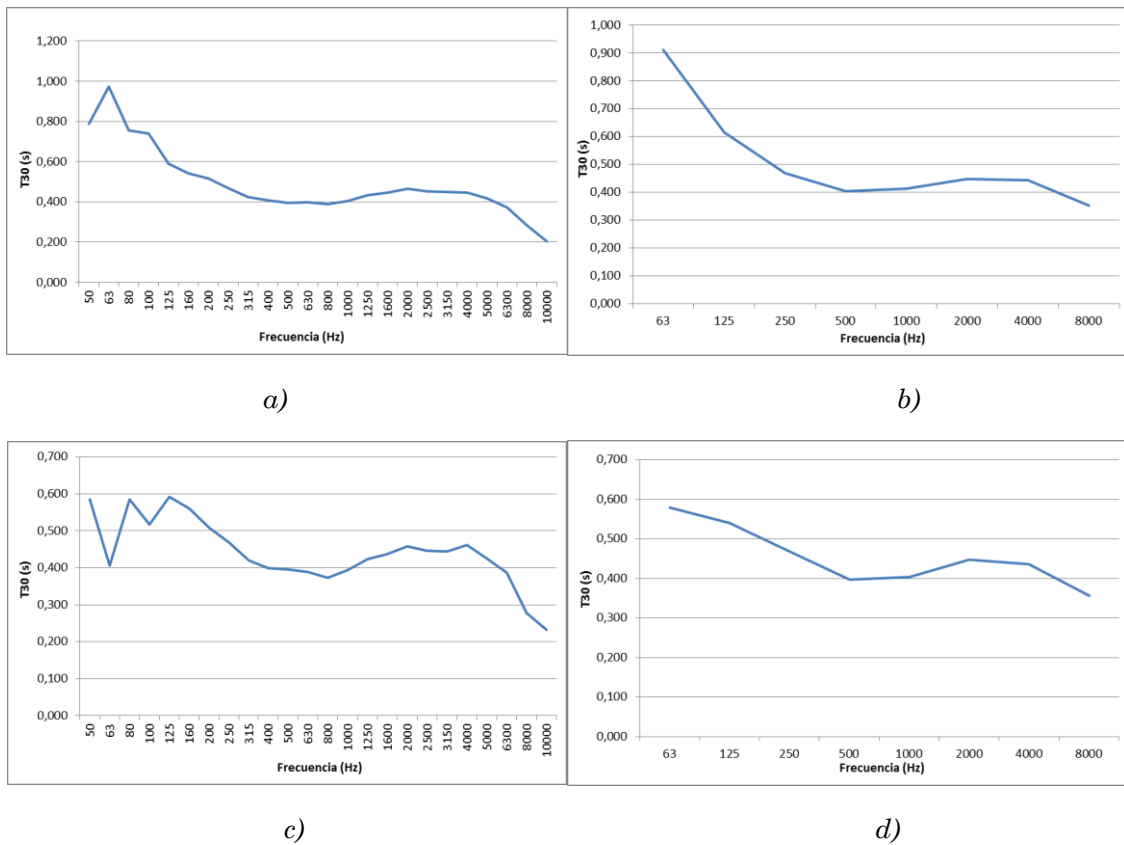


Figura 17: T30 para medidas realizadas utilizando señal de barrido sinusoidal, en tercios de octava (a) y en octavas (b), así como para medidas realizadas con señal MLS en tercios de octava (c) y en octavas (d)

Capítulo 3: Modelo virtual de la sala

Una vez terminado el trabajo de medidas en la sala, es el momento de realizar el modelo virtual correspondiente a la misma. Para ello se utilizará el programa EASE en su versión 4.3 que es un completo programa utilizado para realizar simulaciones acústicas y trabajos de refuerzo sonoro, entre otros usos. El uso de su manual [14] resulta muy útil para realizar todas las acciones descritas en este capítulo.

1. Creación de la sala

El primer paso es construir la sala sobre la que se está trabajando en EASE. Para esto se hará uso de las medidas de las dimensiones de la misma que se hicieron con el medidor láser y la cinta métrica.

El primer paso tras abrir el programa es crear un nuevo proyecto abriendo en la parte superior el menú *File* y seleccionando la opción *New Project*. Se abrirá una nueva ventana en la que se le da nombre al proyecto y se introduce una breve descripción sobre el mismo, tras lo que se pulsa *Create* y el proyecto queda creado.

A continuación, se entra en el modo de edición seleccionando la opción *Project Data* del menú *Edit*, o pulsando sobre el icono correspondiente de la barra de herramientas. En esta nueva ventana, se introducen uno a uno los vértices que conforman cada una de las caras, empezando por las zonas más generales y amplias como paredes o el techo y finalizando por zonas pequeñas como los escalones. Una vez se introduzca un vértice, se pueden introducir el resto duplicando éste y desplazando la copia para no tener que colocar un nuevo vértice cada vez que se quiera crear un punto nuevo, de manera que el proceso se agiliza bastante.

A la hora de crear la sala es importante tener en cuenta que EASE por defecto considera que la dirección de propagación del sonido se produce en el sentido negativo del eje Y, por lo que si se coloca la pared correspondiente a la pantalla en el plano (0,0,Z), la sala deberá construirse hacia la parte negativa del eje Y para que, al introducir las fuentes y receptores posteriormente, no haya que modificar su orientación.

A medida que se introducen los vértices que conforman una cara, se pueden ir creando dichas caras seleccionando la opción *Insert Face* y uniendo los vértices que componen la cara. Es muy importante vigilar la orientación de la cara creada ya que EASE distingue entre los lados interior y exterior de la cara, quedando estos resaltados de color amarillo y blanco,

respectivamente, al seleccionar la cara. Por lo que si alguna cara queda al revés, se gira seleccionando la opción *Invert* que aparece en un desplegable al hacer clic con el botón derecho del ratón sobre la cara a girar.

Una vez que está conformado el cuerpo de la sala, se añaden los detalles que tienen determinadas caras como rejillas o el cristal de la sala de proyección. Para ello se introducen los vértices que conforman estos elementos y se redefine alguna cara si es necesario para incluir estos nuevos vértices. A continuación, se crea una cara para dicho elemento y cuando esté orientada correctamente haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre ella se selecciona la opción *Properties* en el desplegable que aparece; se abrirá la ventana de propiedades de la donde hay que marcar la casilla *Is Coat Of* y al pulsar sobre el rectángulo en blanco que aparece al lado de esta opción se selecciona la cara sobre la que se sitúa el detalle en el desplegable que se abre. Con esto se consigue que en la zona que comparten ambas caras se tenga en cuenta sólo la cara más externa, es decir el detalle. Además, también hay que marcar la opción *Two fold* para que no se den problemas.

Cuando se termine de construir toda la sala, hay que asegurarse de que todos los vértices estén correctamente unidos y que no existan huecos al exterior. Para esto, primero se selecciona en el menú *View* de la pantalla principal del proyecto de EASE la opción *Room Info → Data*. En la ventana que se abre, se observan las características de la sala creada, como volumen y superficie y aparece una opción denominada *Room open*, la cual, durante el proceso de creación del modelo puede estar marcada para poder guardarlo sin que la sala esté terminada, pero que ahora debe estar sin marcar para poder verificar que el modelo no tenga agujeros.

A continuación, desde la pestaña *Tools* de la ventana de edición, se pulsa sobre la opción *Check Holes*. Si hay algún punto abierto, se abrirá una ventana donde se podrá seguir el recorrido de los vértices donde se sitúa el problema. Una vez esté solucionado, aparecerá un mensaje diciendo que no hay ningún problema.

Una vez que la sala esté cerrada se añaden los altavoces (*Insert Loudspeaker*) en las mismas posiciones donde se colocaron en la sala real. Como no se dispone del modelo virtual del dodecaedro usado en las medidas in-situ, se utiliza la fuente Sphere que EASE incluye de serie y que tiene un comportamiento omnidireccional. De la misma manera se insertan los micrófonos que en esta ocasión son representados por oyentes (*Insert Listener Seat*). También se marcan las zonas de butacas como zonas de audiencia, mediante la opción *Insert Audience Area*.

El resultado a todo este proceso se observa en las figuras 18, 19 y 20 que representan distintas perspectivas de la sala ya terminada donde las fuentes se identifican por su color azul, los receptores por sillas rojas y las zonas de audiencia por su recuadro verde.

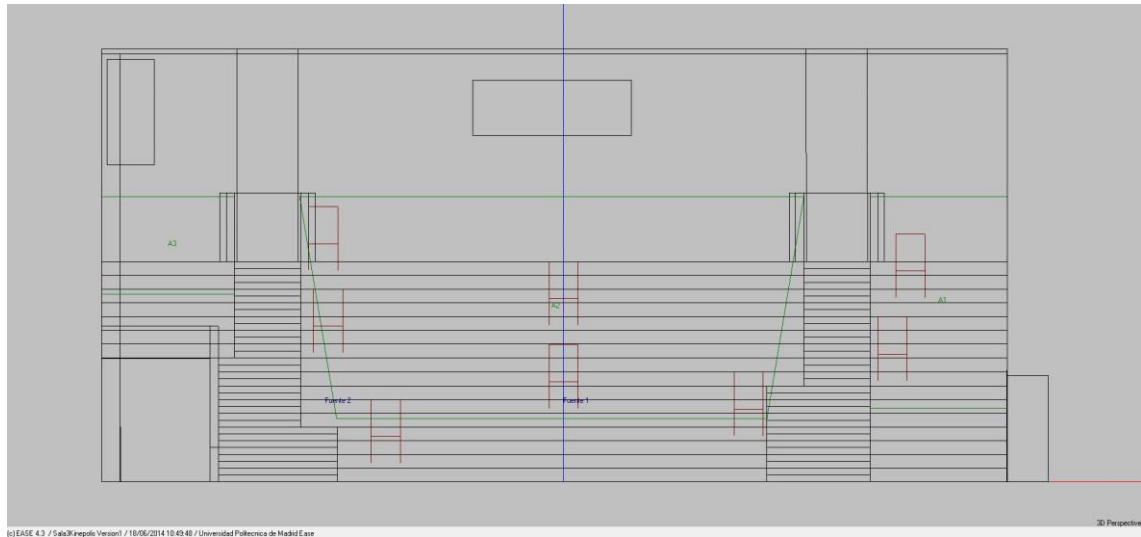


Figura 18: Vista frontal del modelo en EASE de la sala 3 de Kinépolis Madrid



Figura 19: Vista lateral del modelo en EASE de la sala 3 de Kinépolis Madrid

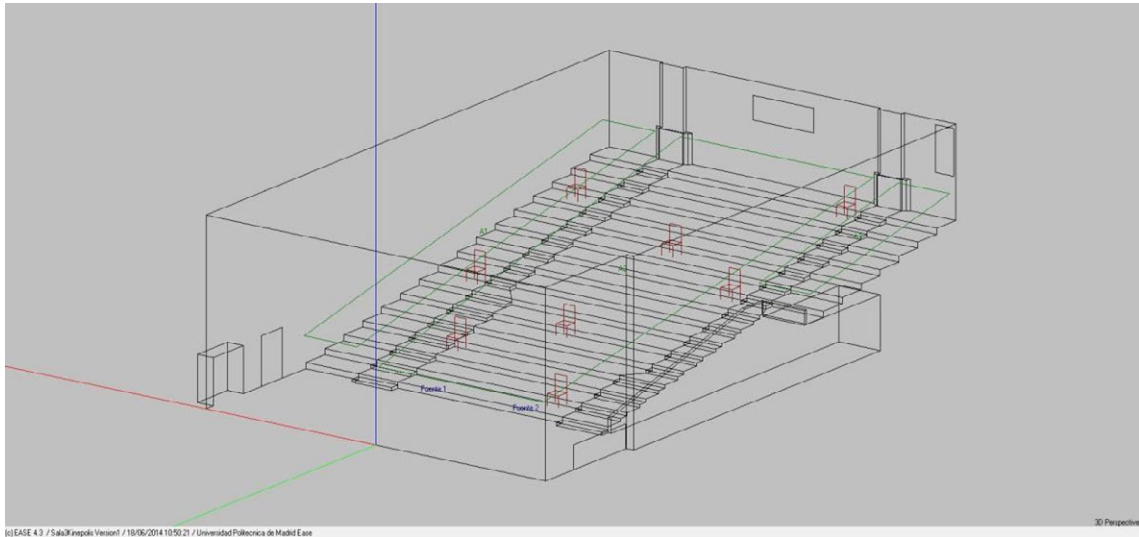


Figura 20: Vista general del modelo en EASE de la sala 3 de Kinépolis Madrid

2. Materiales

Con el modelo ya diseñado el siguiente paso es asignar materiales a cada una de las caras. Esta acción se realiza desde la ventana de propiedades de cada una de las caras abriendo el desplegable *Face* y eligiendo uno de los materiales disponibles que previamente han tenido que cargarse.

A la hora de elegir los materiales surge el problema de que no se conocen cuáles son los originales utilizados en la sala, por lo que habrá que deducirlos a partir de lo que se observó a la hora de medir en la sala. A simple vista se buscarán materiales hechos de fibra de vidrio para las paredes, moqueta para el suelo, butacas de cine para la zona de audiencia, un techo acústico para el techo, cristal para la cabina de proyección, madera para las puertas de entrada a la sala y acero para las rejillas y salidas de emergencia.

Con esto, se buscan los materiales que más se adecuen a la sala en la base de datos de EASE y se importan desde la opción *Select Wall Materials* que aparece al pulsar en el directorio *Project Database* de la ventana principal de EASE.

Al buscar los materiales se encuentran distintos de cada tipo, por lo que se importan todos los que puedan servir para probar cuál da mejor resultado. Tras importar todos los posible materiales, se asigna a cada cara uno del tipo que se ha mencionado anteriormente para empezar a trabajar.

A continuación, desde la ventana de edición, se escoge la opción *Optimize RT* del desplegable *Tools*. Aparece una ventana con dos pestañas, *Edit Graph* y *Edit Table*. En primer lugar, se pulsa sobre la segunda pestaña con lo que aparecerá una tabla con cuatro tiempos de reverberación y otros tantos coeficientes de absorción correspondientes a diferentes casos. En esa tabla, hay que cambiar el RT correspondiente al *Target Value* por el tiempo que se quiere conseguir en la sala, que en este caso será el T30. Para ello, se hace la media para cada banda de tercio de octava de los valores obtenidos en el capítulo anterior y se escriben uno a uno en dicha tabla. Una vez estén todos los valores rellenos se pulsa sobre *Apply*.

Se vuelve a seleccionar la primera pestaña donde aparecen dos gráficas; la superior representa el coeficiente de absorción para cada banda de frecuencia y la inferior, el tiempo de reverberación. En ambas gráficas se utiliza el mismo código de colores representándose en color gris el valor deseado, es decir el que se acaba de introducir; en azul el valor actual y en verde el valor que quedaría al cambiar un material por otro. Precisamente, con este último caso es con el que hay que jugar, en el desplegable *Material* se selecciona uno de los materiales que forman actualmente la sala, y en la pestaña *Tentative* se selecciona otro distinto por el que se podría cambiar para ver como variaría el tiempo de reverberación (la línea verde en la gráfica inferior). Cuando un material de los probados se adapte mejor que el actual, se cambia uno por otro pulsando *Apply*. La idea final es que el tiempo de reverberación de la sala (gráfica azul) se asemeje lo más posible al tiempo deseado (gráfica gris) que es el que estaba presente en la sala real.

Al final, realizando este proceso con todos los materiales se consigue la aproximación que se observa en la figura 21. Hay que tener en cuenta que los materiales correspondientes a zonas pequeñas como rejillas o puertas, casi no tienen influencia en el tiempo de reverberación final, por lo que es mejor centrarse en cambiar los materiales de las zonas principales.

Todos los materiales utilizados, se han cogido directamente de la base de datos de EASE, no obstante, como estos son bastante genéricos en algunos casos puntuales se ha precisado modificar ligeramente sus características para que se adapten a la sala simulada como se comentará a continuación. A la hora de elegir los materiales a modificar se escogieron los que cubren mayor superficie dentro de la sala para que el efecto de estos cambios sea relevante.

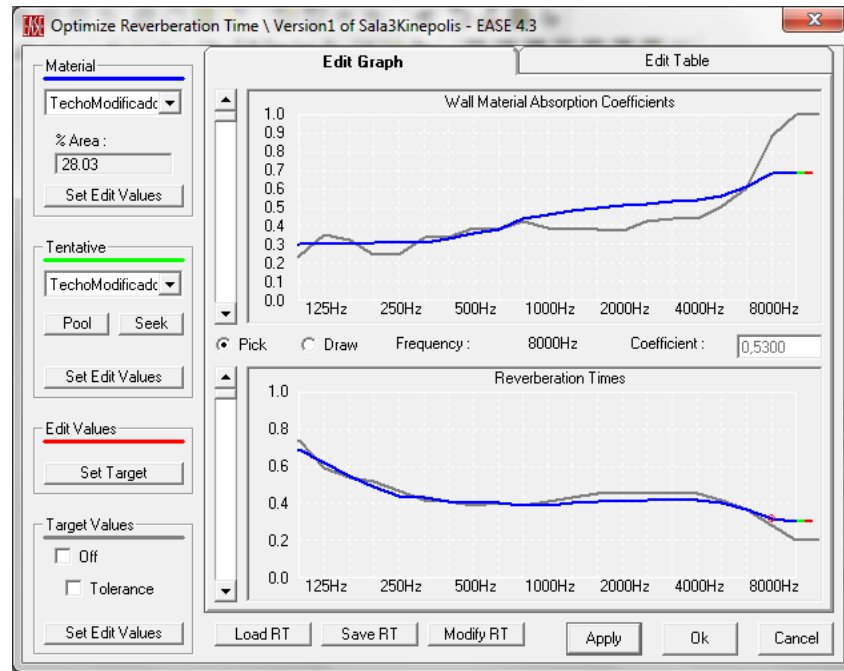


Figura 21: Pantalla Optimize RT de EASE tras seleccionar todos los materiales

Para las paredes se han escogido dos tipos distintos de fibra de vidrio, una para las paredes laterales y otra ligeramente más absorbente para las paredes delantera y trasera. En las figuras 22 y 23 se aprecian sus respectivos coeficientes de absorción. Cabe destacar que la parte frontal de la sala se ha considerado como pared sin tener en cuenta la pantalla; esto se debe a que las pantalla de cine están hechas de un material microperforado que, pese a influir en la acústica de la sala, tienen un coeficiente de transmisión del sonido elevado, pero EASE no tiene en consideración los coeficientes de transmisión de los materiales por lo que a efectos del programa, la pantalla es una pared más.

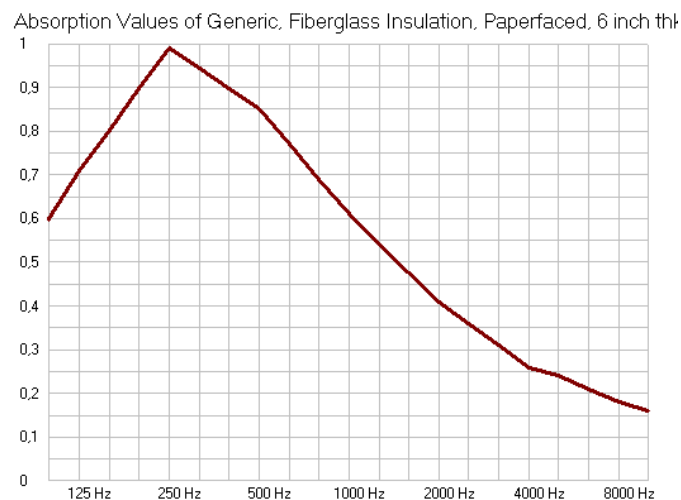


Figura 22: Coeficiente de absorción de las paredes laterales

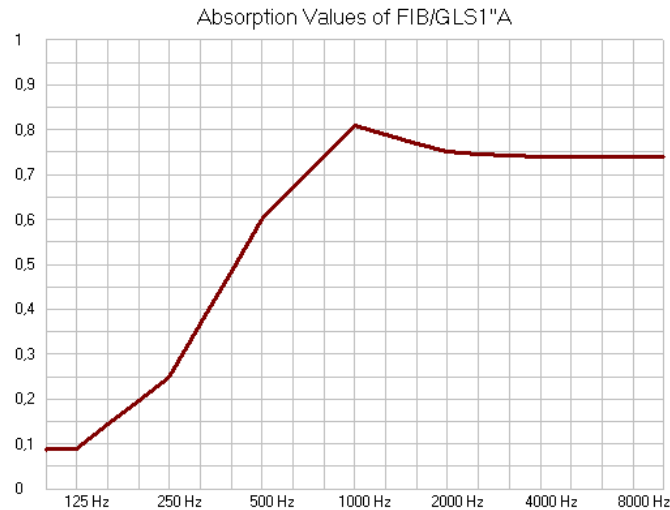


Figura 23: Coeficiente de absorción de las paredes frontal y trasera

Para el suelo se ha utilizado un material que se corresponde a un suelo de madera con moqueta, ya que todo el suelo de la sala estaba enmoquetado. En la figura 24 se observa su coeficiente de absorción.

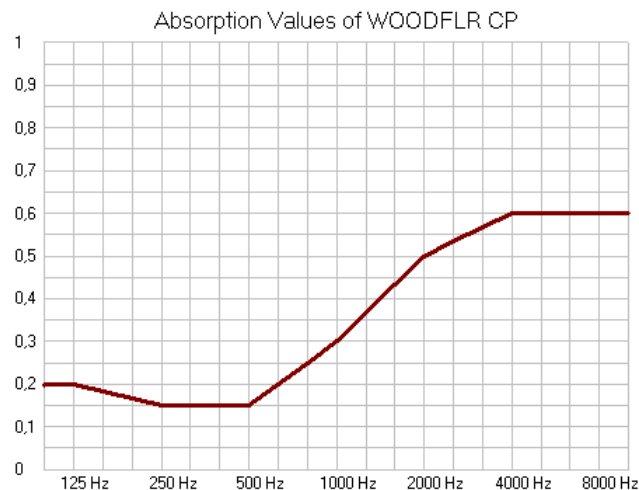


Figura 24: Coeficiente de absorción del suelo

En cuanto a la zona de las butacas se ha utilizado un material de butacas que calcula el coeficiente de absorción por metro cuadrado pero modificándolo en la zona de altas frecuencias para que el tiempo de reverberación final se adapte mejor al deseado. En la figura 25 se aprecia el coeficiente de absorción de este material una vez ya modificado.

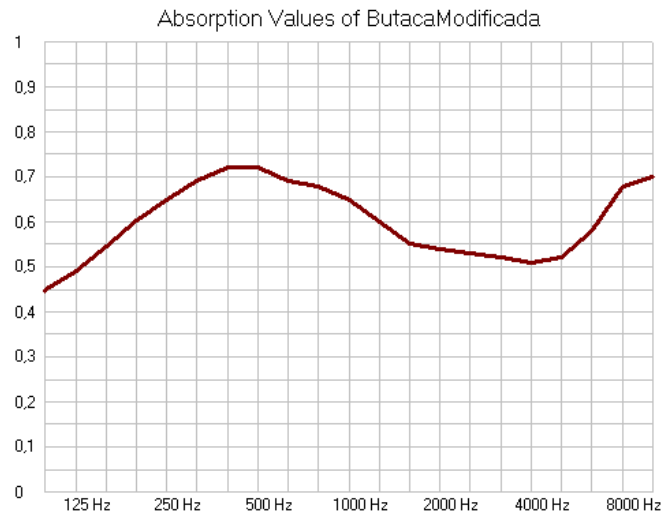


Figura 25: Coeficiente de absorción de la zona de butacas

El material del techo también ha sido modificado a partir de un material de la marca CIRRUS para que a altas frecuencias su absorción o sea tan acusada. Su coeficiente de absorción final se observa en la figura 26.

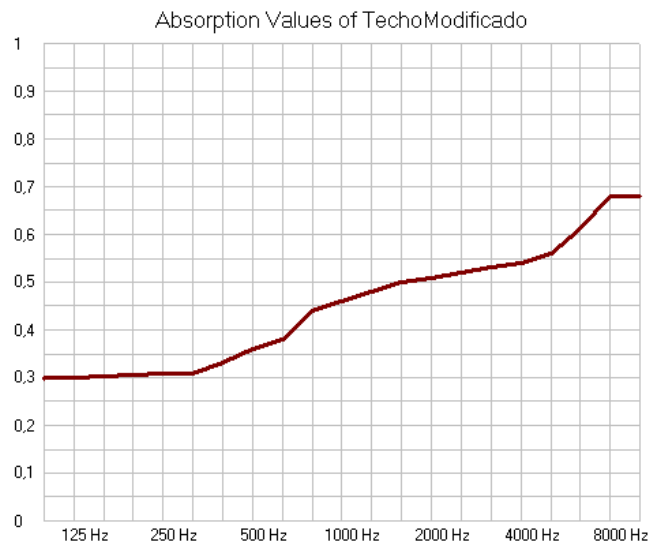


Figura 26: Coeficiente de absorción del techo

Para las puertas metálicas correspondientes a la salida de emergencia de la sala y a la entrada a la cabina de proyección se ha utilizado un material hecho de acero cuyo coeficiente de absorción aparece en la figura 27.

Para las puertas de entrada a la sala, se utiliza una puerta maciza de madera con el coeficiente de absorción que aparece en la figura 28.

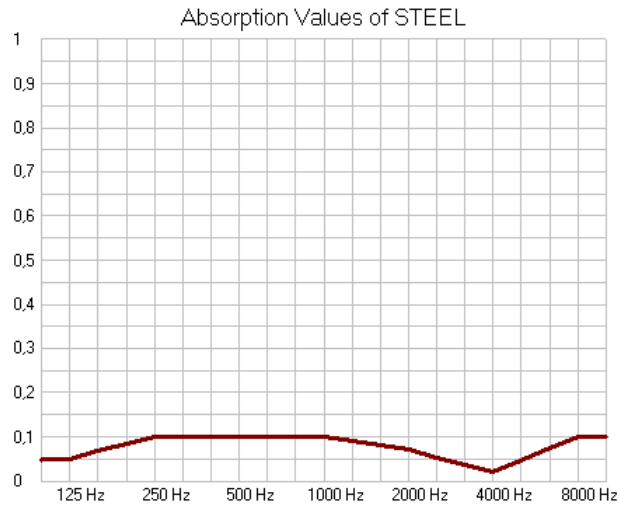


Figura 27: Coeficiente de absorción de las puertas metálicas
Absorption Values of Generic, Door, Solid Core, Wood

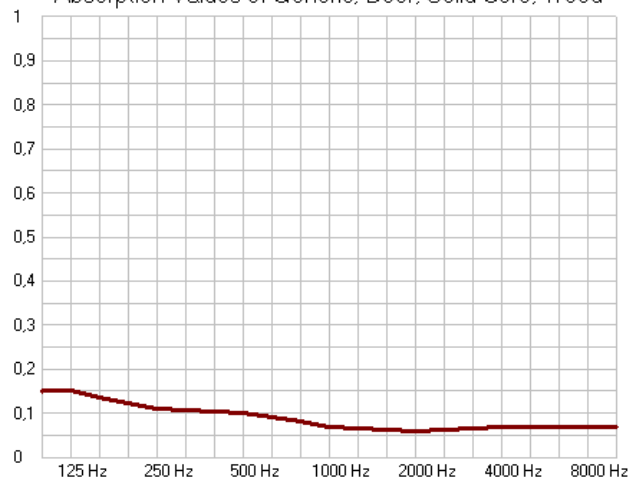


Figura 28: Coeficiente de absorción de las puertas de madera

Para las rejillas, se crea un material partiendo del mismo material de acero usado para las puertas metálicas al cual se le añade un *Scattering* en forma rectangular con lo que se consigue que el material se comporte como si fuese una verdadera rejilla agujereada. En la figura 29 se muestra su coeficiente de absorción. No obstante, si se compara esta figura con la 27, correspondiente al material original, se comprueba que la diferencia entre ambos coeficientes es casi imperceptible, solo se diferencian en la cantidad de material que se considerará a la hora de realizar la simulación.

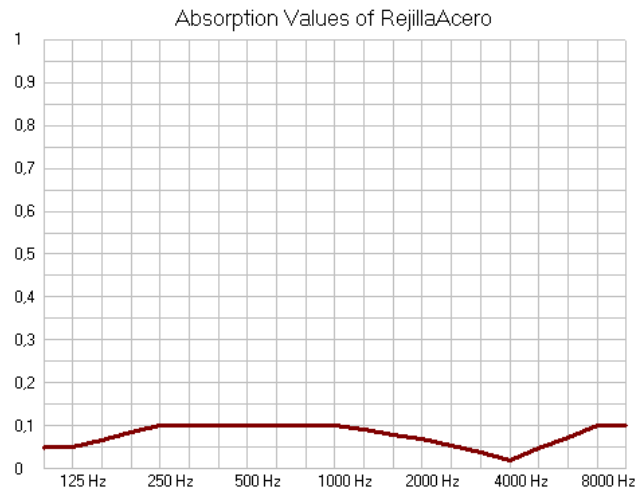


Figura 29: Coeficiente de absorción de las rejillas metálicas

Por último, para el cristal de la cabina de proyección se utiliza un cristal genérico con el coeficiente de absorción de la figura 30.

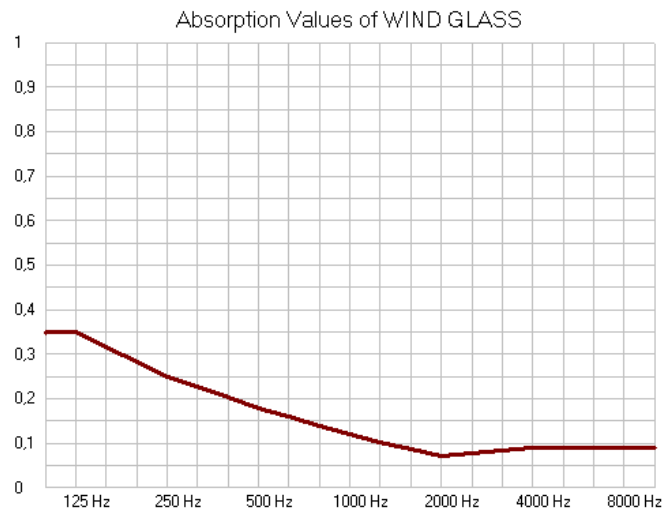


Figura 30: Coeficiente de absorción de la ventana

Finalmente, conviene recordar, al asignar los materiales, que en el paso de diseño de la sala algunas caras se marcaron como dobles, por lo que hay que fijarse que estas caras tengan el material asignado a ambos lados para evitar fallos en la simulación.

3. Simplificación de la sala

Una vez se tiene terminado el modelo de la sala en EASE, se decide simplificarlo para comprobar si, en futuras ocasiones, podría hacerse un diseño menos detallado y por tanto más rápido, obteniendo resultados similares.

En este caso esta simplificación pasa por eliminar todos los escalones de los pasillos y de la zona de butacas, dejando esas zonas como rampas con los mismos materiales que tenían anteriormente.

Surge un problema al realizar esta simplificación, y es que, al eliminar todos los escalones, el volumen de la sala aumenta por lo que no se darían las mismas condiciones en ambos modelos. Para solucionar esta diferencia se calcula el volumen total que ocupan las butacas a partir de las medidas realizadas in-situ, y se introduce este volumen en la nueva sala elevando la zona de butacas respecto a los pasillos y el resto del suelo para que eliminen ese volumen del total de la sala. Al final se consigue la sala representada en las figuras 31, 32 y 33 que es más simple que el modelo original, pero tiene un volumen muy parecido.

En la figura 34, se aprecia con mayor detalle la manera en que se ha introducido el volumen de las butacas en el modelo. Se observa que es muy poca distancia la que se ha tenido que levantar la zona de butacas sobre el nivel del resto del suelo, pero con ese simple cambio es suficiente.

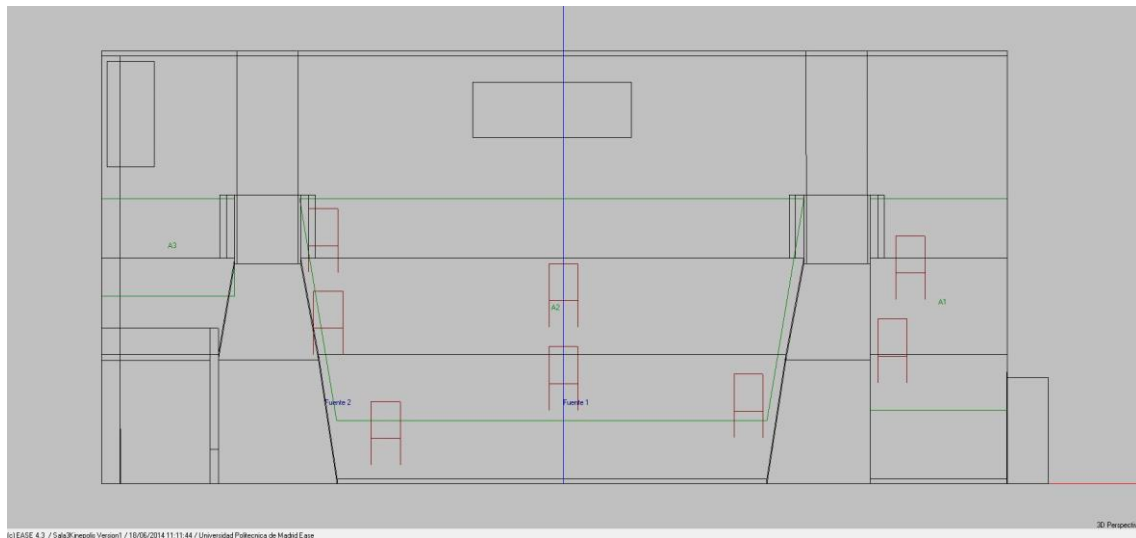


Figura 31: Vista frontal del modelo simplificado de la sala 3 de Kinépolis Madrid

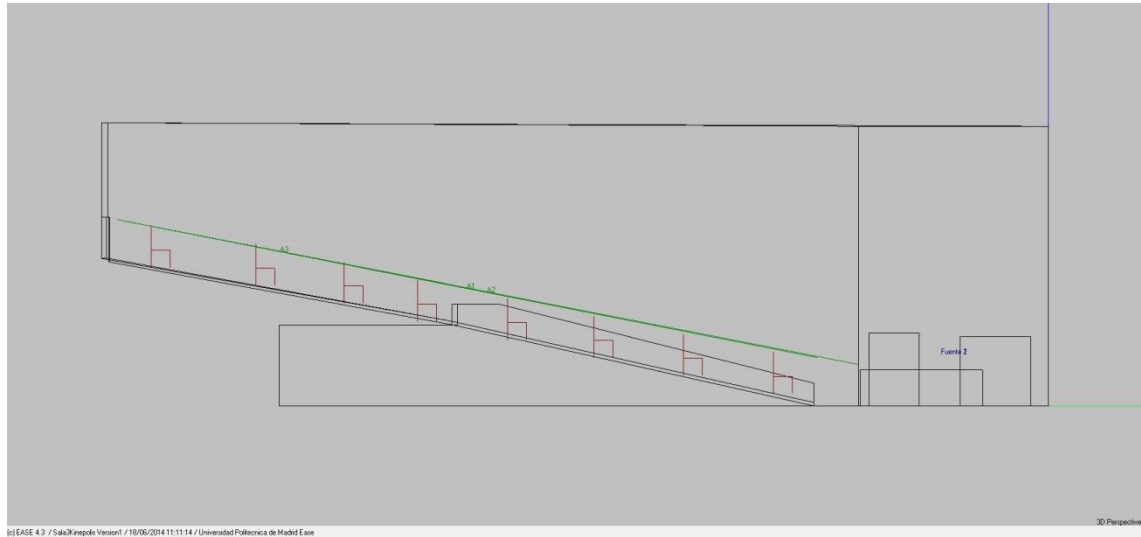


Figura 32: Vista lateral del modelo simplificado de la sala 3 de Kinépolis Madrid

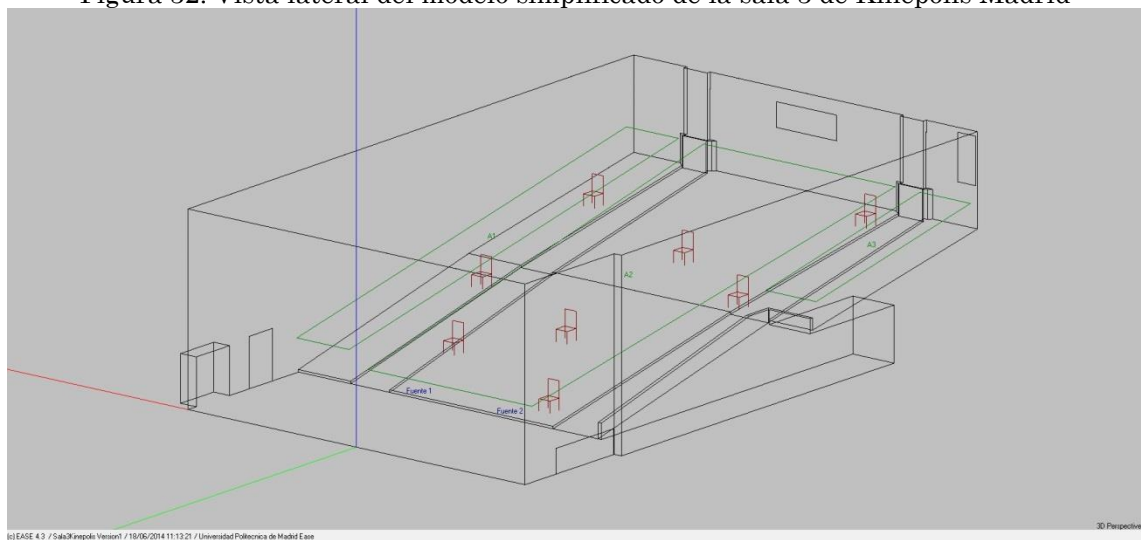


Figura 33: Vista general del modelo simplificado de la sala 3 de Kinépolis Madrid

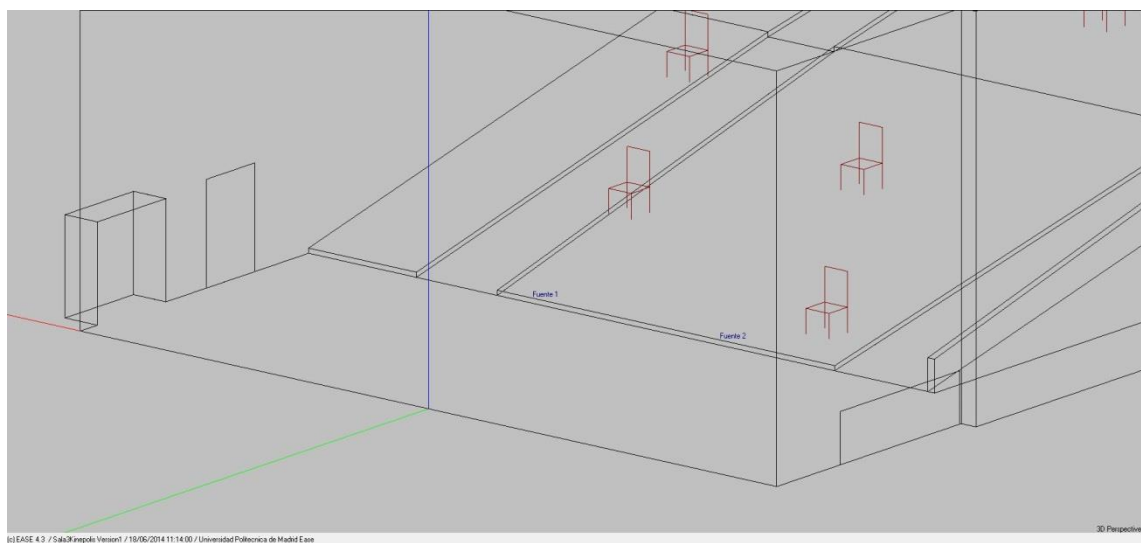


Figura 34: Detalle de la zona de audiencia del modelo simplificado de la sala

Así mismo, en la figura 35 aparece la ventana Optimize RT para esta nueva versión de la sala sin cambiar ninguno de los materiales. Si se compara con la misma ventana para la sala original (figura 21), se observa que no solo no se ha descompensado el tiempo de reverberación al eliminar elementos de la sala, sino que la aproximación de este al deseado es ahora ligeramente mejor en especial a frecuencias medio-altas. Esto es un primer signo de que esta versión de la sala se comportará mejor que la versión compleja.

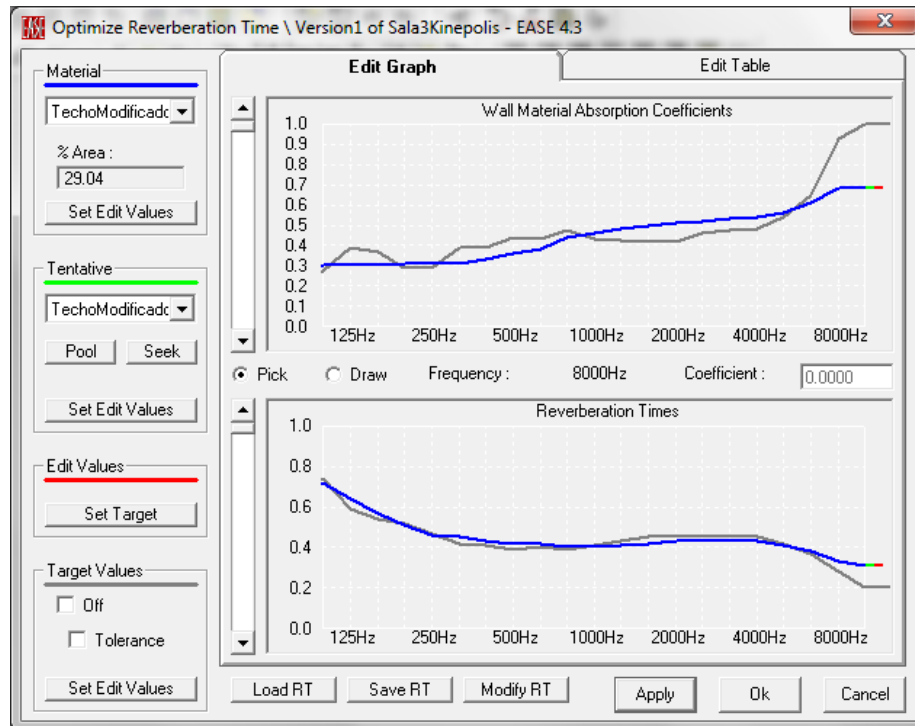


Figura 35: Pantalla Optimize RT de EASE para el modelo simplificado de la sala

4. Simulación

Teniendo ya los dos modelos simulados se pueden obtener los mismos parámetros que se midieron en la sala. Para ello, se utiliza el módulo *Area Mapping* que se abre desde el menú *Calculations* de la ventana principal de EASE. Al abrirlo, aparecerá una pantalla como la de la figura 36, donde aparecen representadas las zonas de audiencia definidas en la sala y varias barras de herramientas con multitud de opciones.

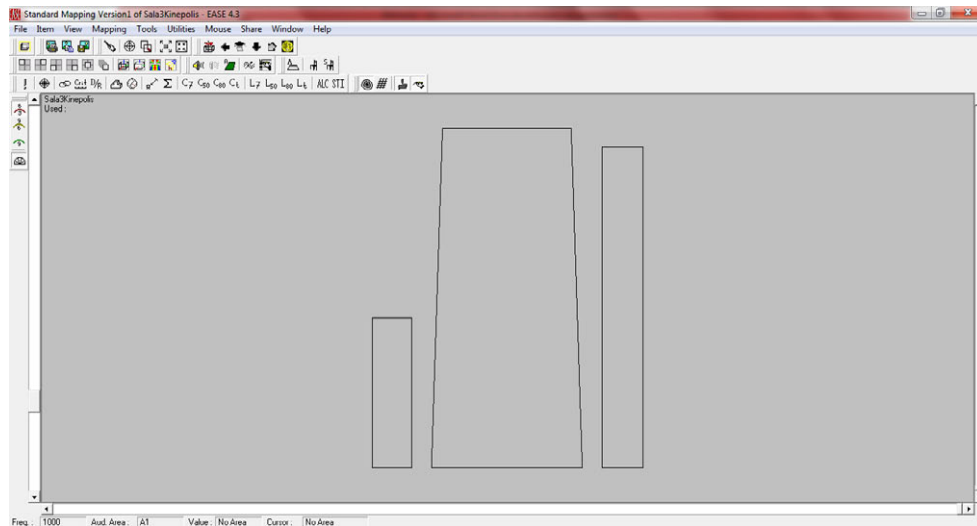


Figura 36: Módulo Area Mapping

Desde este módulo, pueden obtenerse mediciones rápidas de los distintos parámetros y de los niveles de presión presentes tanto en cada una de las áreas de audiencia completas, como en cada posición de medida definida utilizando el método *Standard Mapping*.

No obstante, EASE tiene otra opción para realizar la simulación que es la llamada *Aura Mapping*. Este método es mucho más lento que el método estándar, pero es también mucho más preciso, por lo que es el que se utilizará. Para acceder a la simulación *Aura*, se pulsa sobre el menú *Mapping* del módulo abierto anteriormente y se escoge la opción *Aura*. Con esto se abrirá una ventana donde hay que configurar la simulación por medio de 4 pestañas.

En la primera pestaña, *Settings*, se configuran los parámetros generales de la medida, como el nombre y la fuente o fuentes en uso. Además, aparecen varios parámetros referentes a la resolución; tras realizar varias pruebas, se obtiene una resolución buena dejando esos parámetros con el valor por defecto excepto el *Patch Size* que se cambia a 0.5.

En la segunda llamada *Items*, se seleccionan las posiciones sobre las que se realizará la simulación. Primero se selecciona una de las fuentes junto a las tres áreas de audiencia y las ocho posiciones de los micrófonos. Cuando se realice esta simulación, se repetirá de nuevo pero cambiando a la segunda de las fuentes.

La tercera pestaña, *Noise*, tiene en cuenta el ruido presente en la sala. EASE toma un ruido de 40 dB en todas las bandas de octava por defecto, pero en este caso se cambia por la media del ruido medido en el

capítulo 2 con el sonómetro en cada una de las posiciones que fue de unos 10 dB como medida.

La última pestaña, *Calculations*, se utiliza para configurar la calidad de la medida. Antes de realizar las medidas definitivas se han hecho varias pruebas con distintas configuraciones de estos parámetros para ver en qué medida influyen en los resultados. En primer lugar, se hacen varias pruebas eligiendo distintas resoluciones; si se elige una resolución baja, el cálculo es mucho más rápido que al elegir la resolución alta pero los resultados tienen menos precisión. En cambio, al elegir una resolución intermedia el cálculo sigue siendo bastante rápido (unos 2 minutos para las 8 posiciones) y los resultados se asemejan bastante a los arrojados por una resolución mayor, por lo que se usará la resolución intermedia. A continuación, se escoge la longitud de la medida; en este caso se escoge la opción *Long* para obtener suficiente calidad. El siguiente parámetro se refiere al *Scattering* y se deja la opción marcada por defecto. Por último, aparece el parámetro *threads* que sirve para dividir la simulación en varios procesos paralelos de modo que se ahorre tiempo. Se prueban varias configuraciones y se llega a la conclusión de que los resultados no cambian prácticamente al utilizar 1 u 8 hilos simultáneos pero el tiempo de cálculo si se reduce considerablemente y el equipo no se ve sobresaturado por el cálculo; por tanto utilizará una configuración de 8 hilos.

Tras configurar el sistema como se ha descrito, se realizan las medidas que serán 4 en total para cada sala: una en los puntos donde se tomaron los datos en la sala real y otra en las áreas de audiencia completas para cada una de las dos fuentes. Es muy importante guardar cada una de las medidas realizadas para, posteriormente, poder abrirlas de nuevo con EASE y extraer los datos medidos. El tiempo que consumieron estas simulaciones fue de unos 2 minutos para las 4 simulaciones que se realizan sobre los 8 puntos escogidos para colocar los micrófonos, y de unos 25 minutos para las 4 medidas realizadas sobre las áreas de audiencia. En el caso del modelo simplificado de la sala, estos tiempos se redujeron ligeramente sobre todo al realizar la simulación sobre las áreas de audiencia definidas.

Todos los ficheros de EASE obtenidos mediante el proceso descrito anteriormente se encuentran incluidos en el CD que acompaña a esta memoria por si se estima oportuna su consulta.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación comparando los casos de la sala completa y la simplificada.

En primer lugar, se tienen en cuenta los niveles directos de presión sonora que se reciben en las áreas de audiencia. En la figura 37 se recogen los niveles directos medidos con la fuente 1, mientras que en la figura 38 aparecen los correspondientes a las medidas usando la fuente 2. A simple vista se percibe que en ambos casos los niveles son completamente iguales lo que parece indicar que se podrá utilizar la sala simplificada en vez de la compleja sin ningún problema.

No obstante, se realiza la misma comparación en las figuras 39 y 40 para los niveles totales recibidos. Se observa que los niveles vuelven a coincidir en el caso de ambas salas, pero en esta ocasión los resultados resultan ligeramente mejores en la sala simplificada, ya que, ante las mismas condiciones, tiene una caída de nivel mejor, lo que probablemente se deba a que en su interior se produzcan menos reflexiones y por tanto, es de esperar que los parámetros con los que validaremos la sala funcionen mejor en el caso de la sala menos detallada.

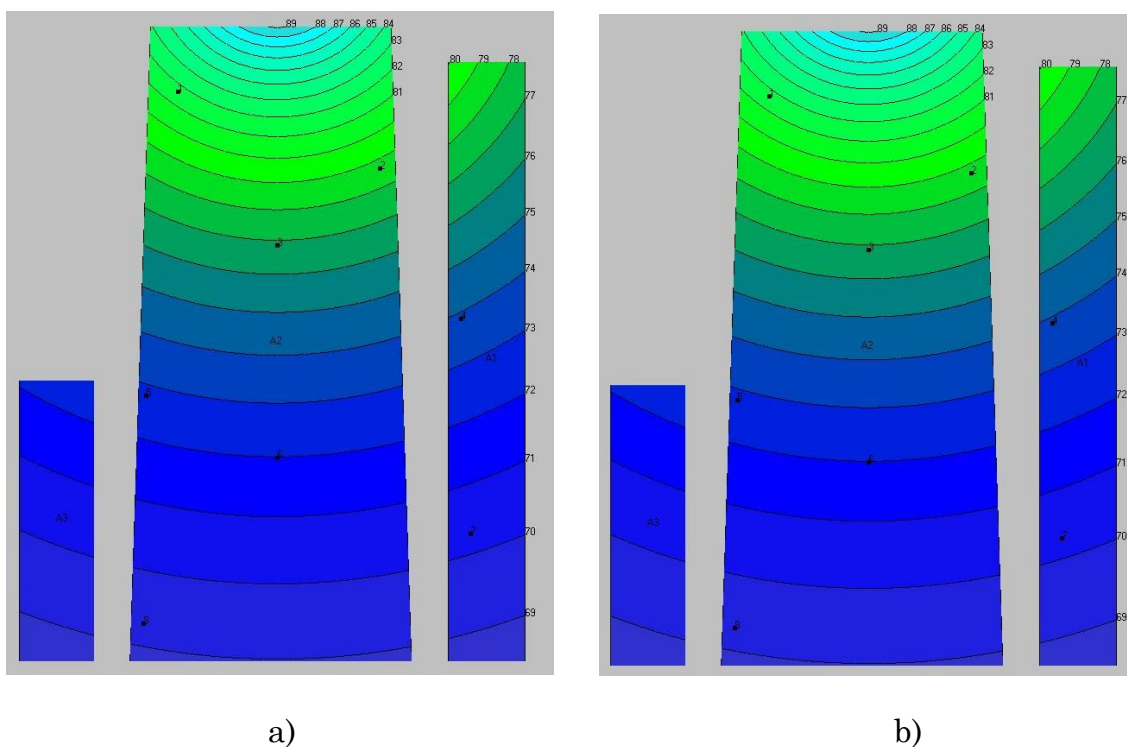
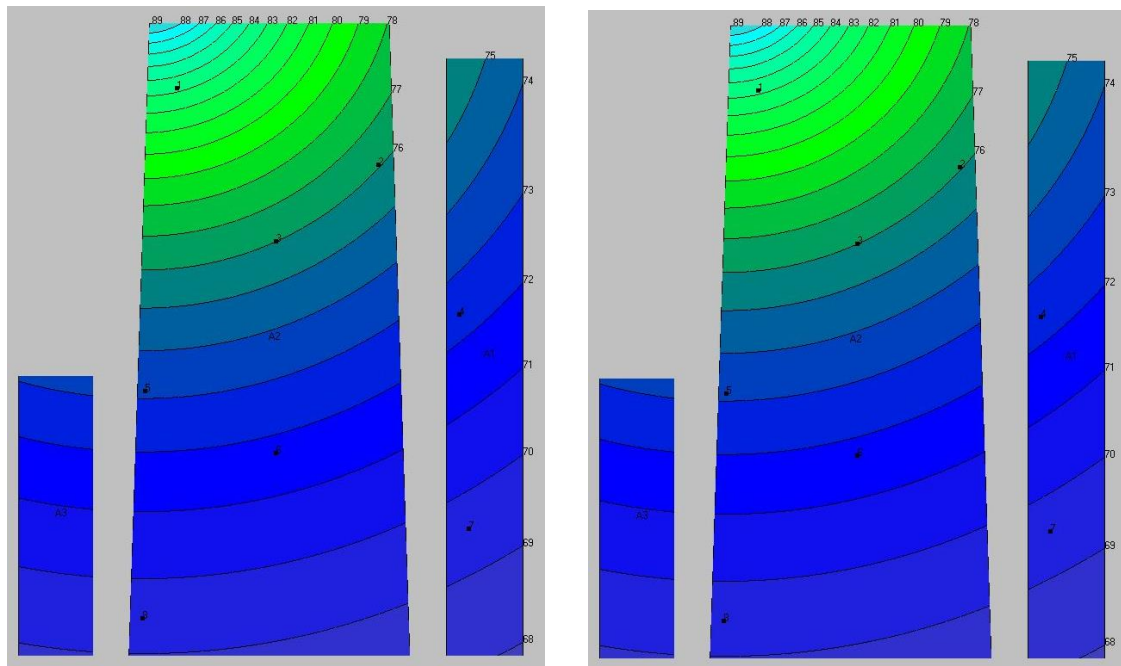


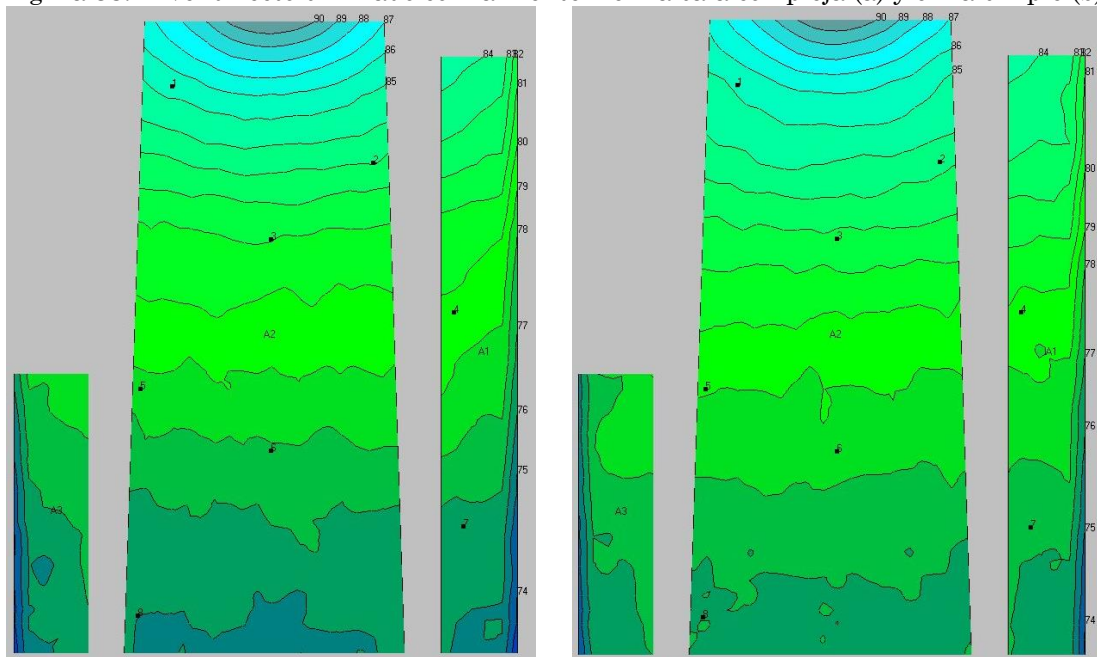
Figura 37: Nivel directo simulado con la fuente 1 en la sala compleja (a) y en la simple (b)



a)

b)

Figura 38: Nivel directo simulado con la fuente 2 en la sala compleja (a) y en la simple (b)



a)

b)

Figura 39: Nivel total simulado con la fuente 1 en la sala compleja (a) y en la simple (b)

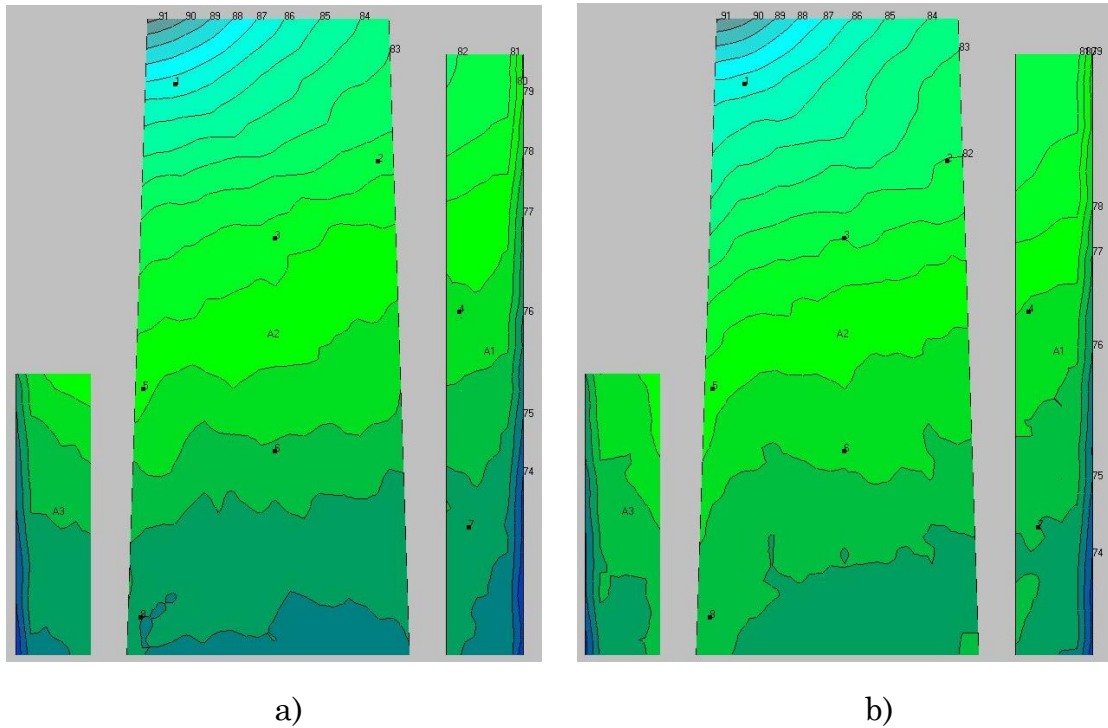
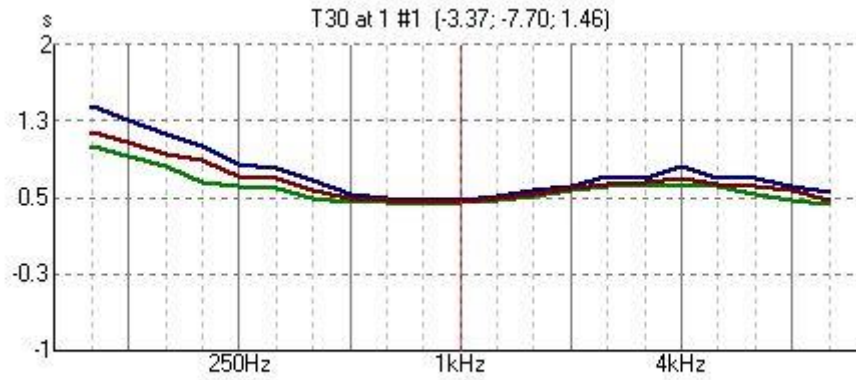


Figura 40: Nivel total simulado con la fuente 2 en la sala compleja (a) y en la simple (b)

A continuación, se realizan algunas comprobaciones respecto al tiempo de reverberación. En las figuras 41 y 42, se muestran las gráficas correspondientes al T30 resultante de realizar la simulación sobre las áreas de audiencia completas emitiendo con la fuente 2, para cada una de las salas a modo de ejemplo. En color azul se representa el valor máximo, en rojo el valor medio y en verde el mínimo para cada frecuencia. Se observa que la forma de la gráfica es muy parecida y los valores medios también, por lo que se vuelve a comprobar que ambas salas se comportan de forma muy parecida.



(c) EASE 4.3 / Sala3Kinopolis Version1 / 18/06/2014 10:59:02 / Universidad Politécnica de M.

Figura 41: T30 en la sala compleja cuando emite la fuente 2.



(c) EASE 4.3 / Sala3Kinopolis Version1 / 18/06/2014 11:21:11 / Universidad Politécnica de M.

Figura 42: T30 en la sala simplificada cuando emite la fuente 2

Por último, se calculan las medias del T30 medido y calculado utilizando cada uno de los modelos. En la figura 43 se representa en azul el T30 medio medido en la sala, en rojo el obtenido a partir de la simulación en la sala compleja y en verde el obtenido a partir de los datos obtenidos en el modelo simplificado de la sala. De nuevo se comprueba que las dos simulaciones se comportan de manera muy similar pero esta vez también se observa que los tiempos de reverberación obtenidos mediante las simulaciones son superiores al medido en la sala real especialmente en las zonas de bajas y altas frecuencias. Esto parece indicar que el tiempo de reverberación no es el mejor parámetro para validar los modelos, como se comprobará más adelante.

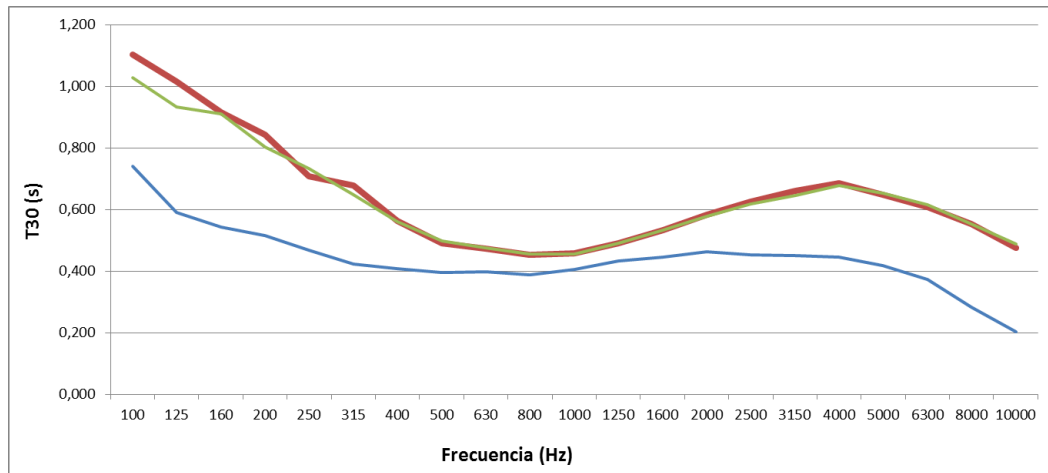


Figura 43: T30 medios para la sala real, el modelo virtual complejo y el modelo virtual simplificado

Capítulo 4: Validación del modelo

Para validar los datos obtenidos a partir del modelo creado, se tendrán en cuenta las diferencias entre los resultados de las medidas realizadas in-situ, y los resultados arrojados por EASE tras al calcular la simulación de la sala para cada una de las posiciones donde se colocaron los micrófonos y los oyentes respectivamente.

Como se ha venido comentando a lo largo de la memoria, se pondrá especial atención en el tiempo de reverberación ya que es el parámetro más importante y con el que se ha ajustado el modelo en EASE de la sala, aunque se estudiarán todos los parámetros.

Para ello, se calculará para cada uno de los parámetros definidos en el capítulo 1 excepto para los de inteligibilidad, el JND o *Just Noticeable Difference* que es un parámetro definido en la norma UNE-EN ISO 3382-1 [8] que establece el valor que no se debe superar para que el modelo sea válido. Concretamente, se refiere a la variación más pequeña que el oído humano es capaz de distinguir entre dos sonidos distintos, por lo que es una medida subjetiva.

Como se ha hecho anteriormente, también se diferenciará entre los casos del modelo complejo y del simplificado. La manera de calcular el JND será simplemente la diferencia entre los valores medidos en la sala y los simulados. En el caso de que el valor se exprese en porcentaje, se calculará de la manera recogida en la ecuación 12:

$$JND = \frac{|dato\ medido - dato\ simulado|}{dato\ medido} \quad [Ec. 12]$$

Para que el modelo pueda ser validado, las medidas no deben superar los dos JND. Lógicamente lo óptimo sería no superar ni siquiera un JND.

Con los resultados obtenidos, se valorará qué parámetro, si es que hay alguno, es el mejor para validar los modelos creados.

1. T30

En primer lugar, se estudiará el tiempo de reverberación. La norma establece que su JND es el 5% y está definido para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz.

Se comienza realizando cálculos para los datos obtenidos a partir del modelo complejo de la sala. Los datos que se utilizarán serán los medidos en tercios de octava.

Primero, se calcula la media de las bandas de 500 a 1000 Hz para todos los puntos y para la media obtenida entre todos, tanto para los datos simulados, como para los medidos. A continuación, se calcula el JND utilizando la ecuación 12 con lo que se obtienen los resultados presentados en la figura 44. En dicha figura, se observa que en este caso los resultados no son nada buenos ya que en casi todos los puntos el JND (JND medido en la leyenda) es superior al 15%, valor que se correspondería con 3 JND. Es por lo que se considera necesario realizar los cálculos de otra manera para ver si se consiguen mejores resultados.

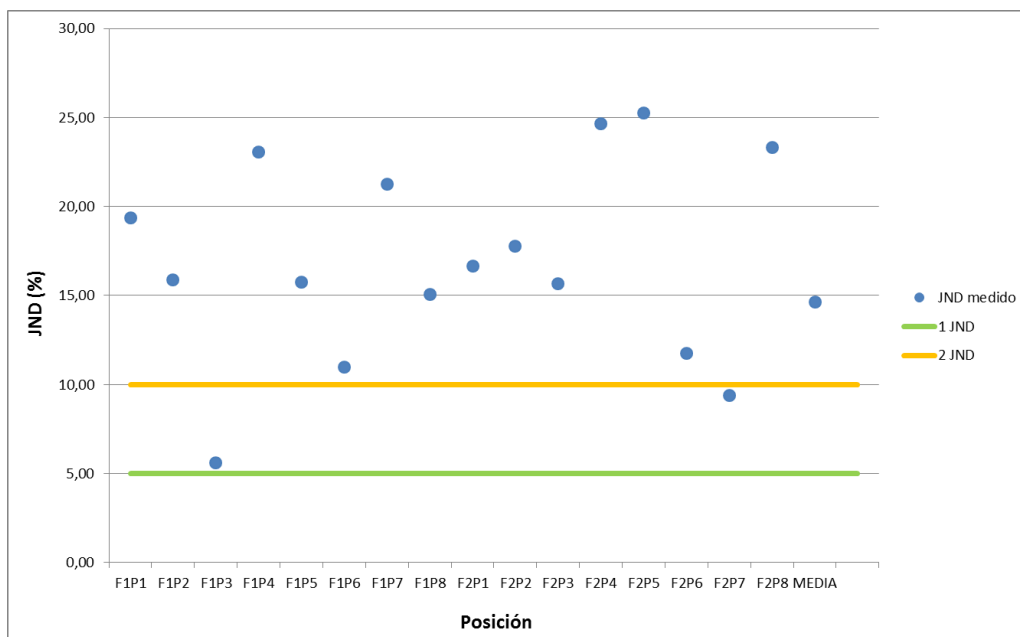


Figura 44: JND para el T30 de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio

Se realiza el mismo cálculo, pero para cada banda de frecuencia, incluyendo aquellas que no están definidas en el JND, es decir, se compara el T30 medido y calculado mediante la fórmula de Eyring con el simulado en *Aura*. También se repite el cálculo para cada posición y frecuencia, pero en ambos casos los resultados son incluso peores evidenciándose que la única zona donde los resultados se acercan a los deseados es la de frecuencias en torno a 1 kHz pero siguen sin entrar en el rango deseado. Por tanto, el T30 parece no ser un buen parámetro para validar el modelo de la sala.

Antes de repetir los cálculos para el caso del modelo simplificado, se realiza una última comprobación para confirmar si la sala modelada se corresponde con la real. Para ello desde las tablas que aparecen en la ventana *Optimize RT* de EASE, se seleccionan *T30 target* y *T30 room*, que se corresponden respectivamente con el tiempo medio de reverberación deseado en la sala (que coincide con el medido in-situ) y con el presente en la sala modelada, no con el obtenido a partir de la simulación. Con estos dos datos se calcula el JND para todas las bandas de frecuencia obteniéndose los datos mostrados en la figura 45. En este caso, como era de esperar, los datos obtenidos son muy buenos encontrándose casi todos los resultados incluidos dentro de 2 JND. Además, para las bandas en que está definido este parámetro de validación, los resultados están incluidos en un solo JND por lo que se concluye que la sala modelada representa las características de la real.

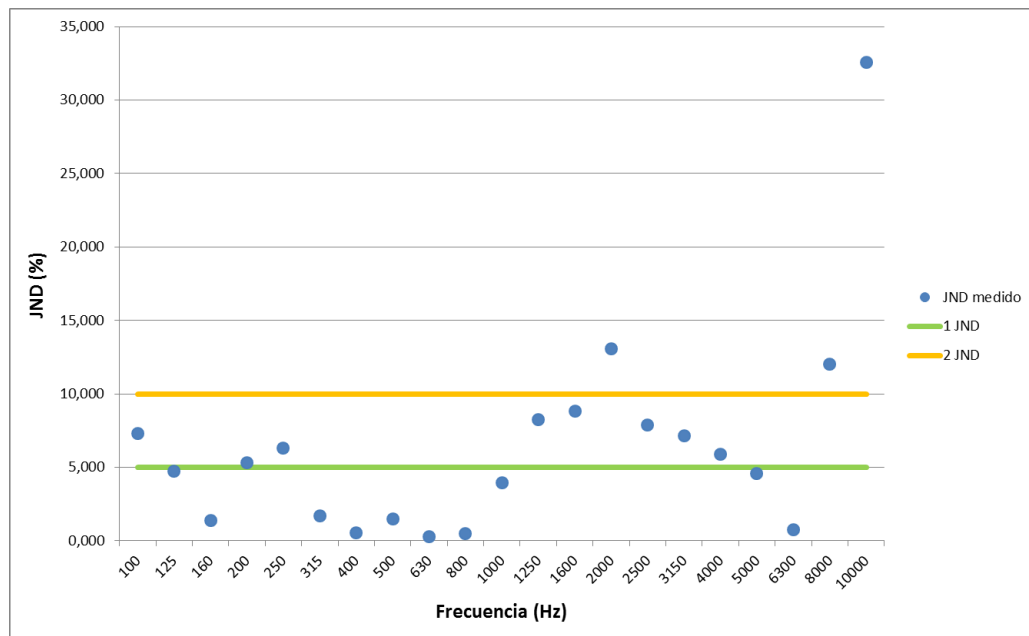


Figura 45: JND en las bandas de tercio de octava para el T30 del modelo virtual complejo de la sala

A continuación, se realizan los mismos cálculos realizados hasta ahora pero en esta ocasión comparando las medidas reales con las simuladas a partir del modelo simplificado de la sala.

En la figura 46, de nuevo se comprueba como el JND punto a punto está muy por encima de los valores ideales ya que casi todos los valores quedan por encima de un 10%.

Si se realiza el cálculo para cada banda de frecuencia, y punto a punto para cada frecuencia se obtienen otra vez los mismos resultados que en el caso del modelo complejo.

Por último, en la figura 47 se compara el *T30 target* y el *T30 room* para el modelo simplificado. De nuevo se obtienen muy buenos JND debido a que el modelo está ajustado a partir del T30 medido en la sala real.

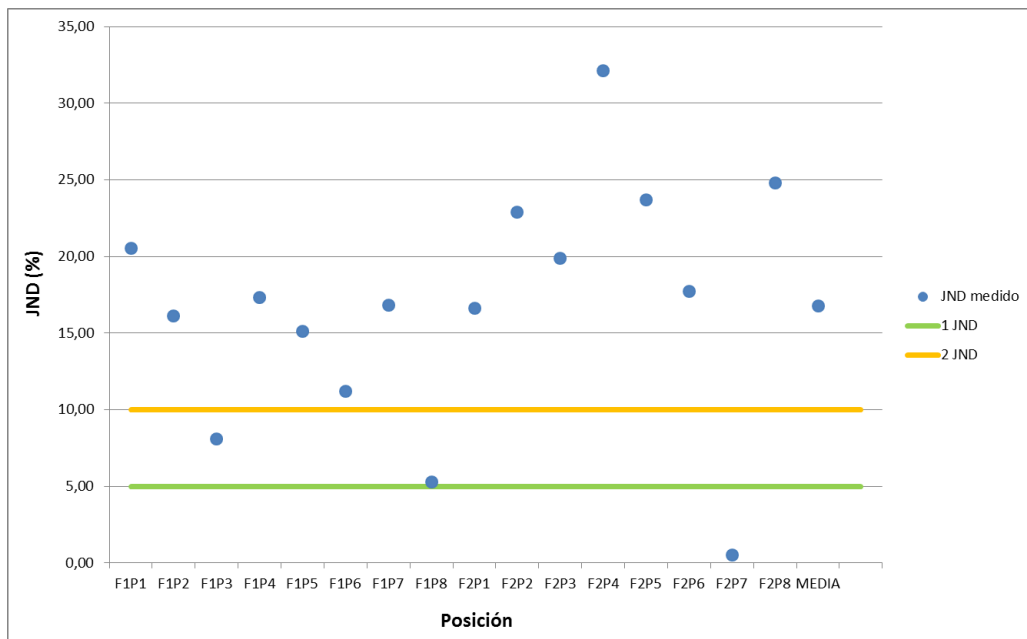


Figura 46: JND para el T30 de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio

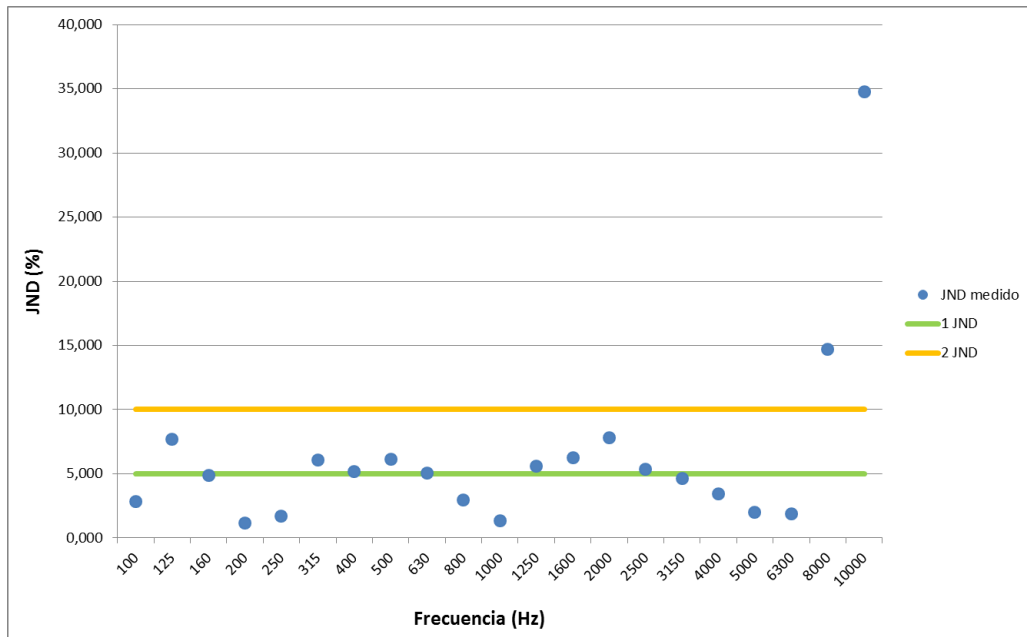


Figura 47: JND en las bandas de tercio de octava para el T30 del modelo virtual simple de la sala

2. EDT

Para el EDT, el JND se define de la misma manera que para el tiempo de reverberación, por tanto los cálculos se realizan de la misma manera. Se realiza la media de las bandas de 500 a 1000 Hz para cada punto de medida y también se realiza la media de ese resultado; este cálculo se realiza tanto para las medidas en la sala como para los datos simulados.

En la figura 48 se observan los resultados al comparar las medidas in-situ con el modelo complejo de la sala, mientras que en la figura 49 se comparan con el modelo simple. Como se aprecia a simple vista, utilizando el EDT no es posible validar los modelos de la sala ya que los valores del JND son demasiado altos. Este hecho era de esperar ya que como se comentó en el capítulo 1, el EDT es un tipo especial de tiempo de reverberación, por lo que si con el T30 no se podían validar los modelos, con el EDT probablemente tampoco, hecho que se acaba de comprobar.

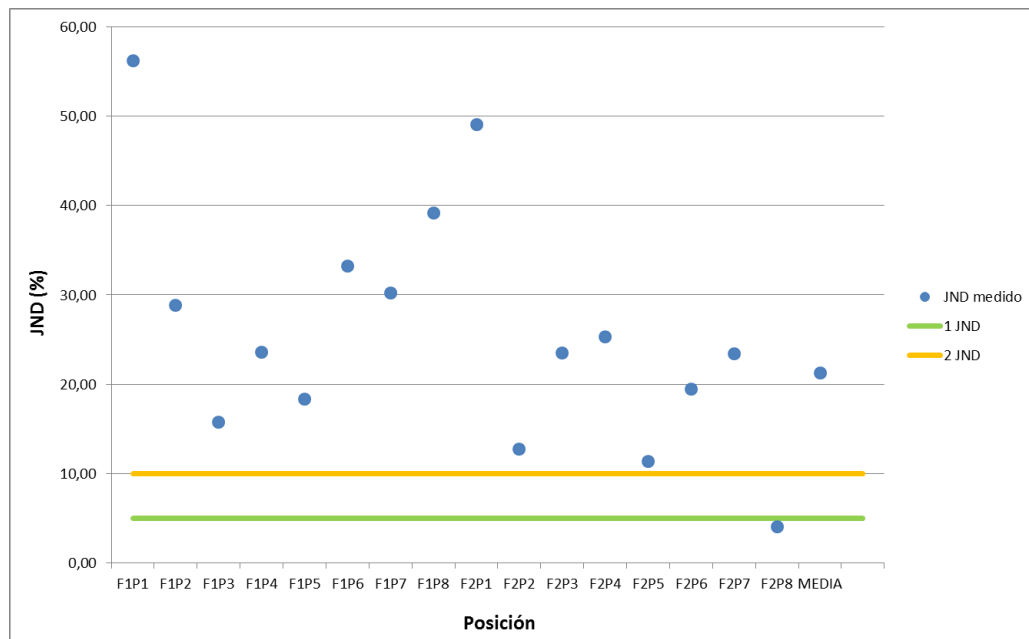


Figura 48: JND para el EDT de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio

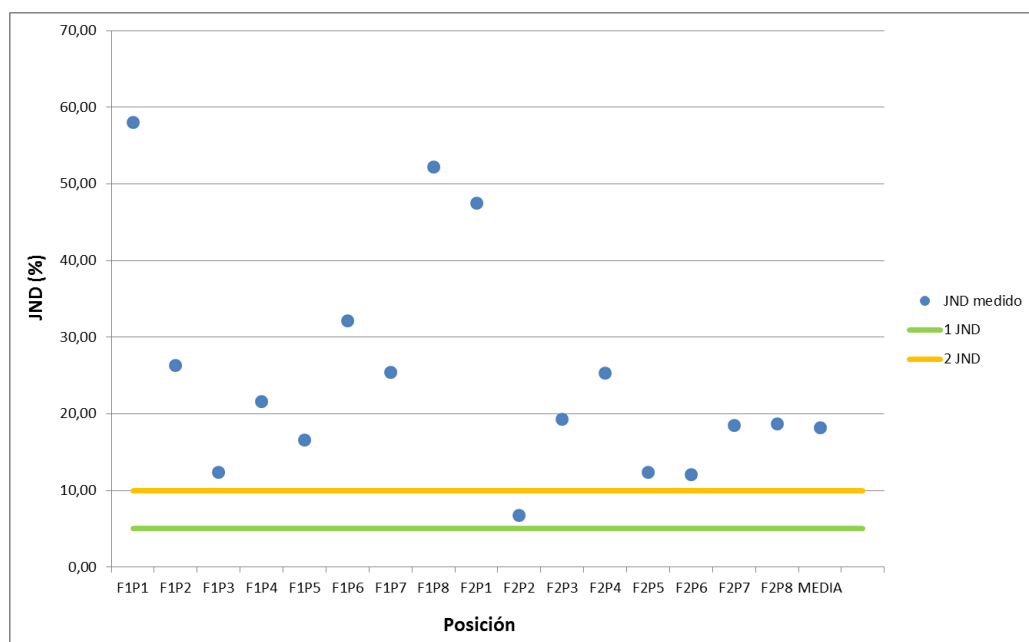


Figura 49: JND para el EDT de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio

3. Ts

En el caso del tiempo central, el JND definido es de 10 milisegundos estando definido para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz como en los casos anteriores.

Se realizan los mismos cálculos que en el caso del EDT obteniéndose la figura 50 para la comparación con el modelo complejo, y la figura 51 al comparar con el modelo simple. En ambos casos, se validan los modelos virtuales creados con EASE ya que, en la figura 50 el JND para el Ts de todos los puntos excepto uno, y de la media de estos es menor a un JND, mientras que en la figura 51 absolutamente en todos los casos se está por debajo de 1 JND.

Por tanto, se concluye que el tiempo central es un buen parámetro para validar los modelos virtuales creados. Además, aunque muy levemente, se observa que los resultados para el modelo simplificado son aún mejores que para el complejo.

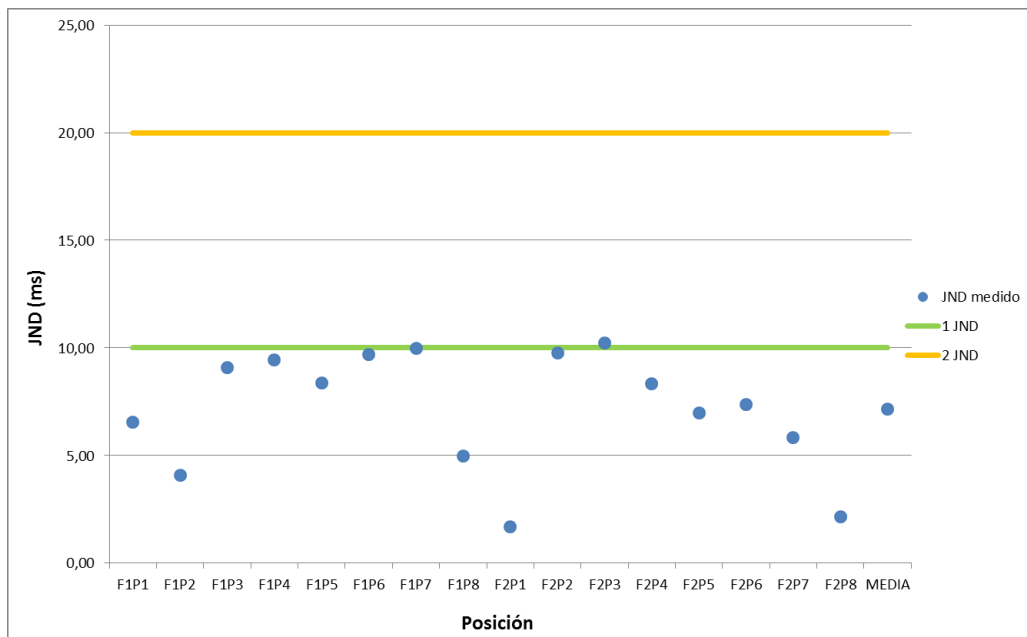


Figura 50: JND para el Ts de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio

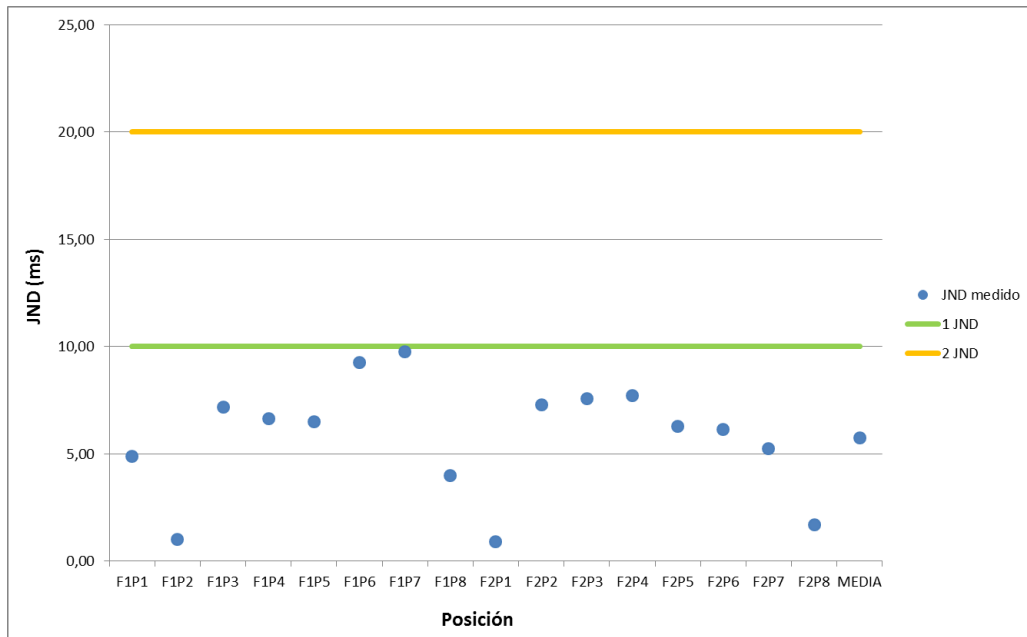


Figura 51: JND para el Ts de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio

Como el tiempo central valida el modelo, se calcula, a modo de curiosidad, el JND aplicado a todas las bandas de frecuencia de tercio de octava y a todos los puntos a la vez y no sólo en las bandas de frecuencia definidas por la norma.

En la figura 52 se representan los resultados para el modelo simplificado, donde puede apreciarse que el JND es excelente en las bandas de frecuencia definidas por la norma como ya se había calculado previamente, pero que además, también se obtienen resultados aceptables a altas frecuencias. No ocurre lo mismo en la zona de bajas frecuencias donde el JND se dispara a valores demasiado altos. Estos resultados de nuevo prueban que éste parámetro es adecuado para validar los modelos.

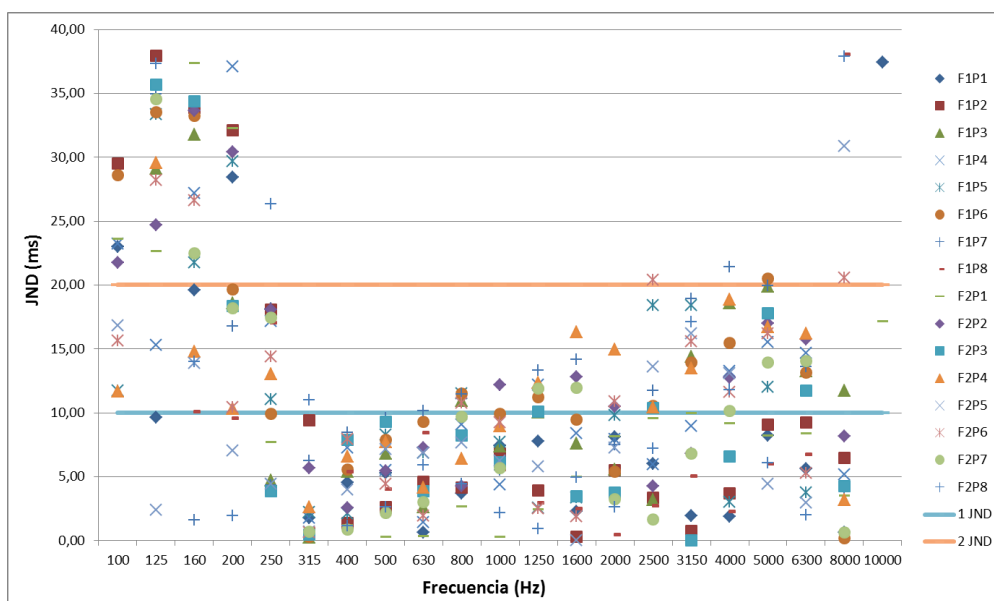


Figura 52: JND para el Ts de las medidas de la simulación simple punto a punto y frecuencia a frecuencia

4. C80

El JND definido para la claridad es de 1 dB, siendo este ideal para las mismas bandas de octava que los casos anteriores. Los resultados para el modelo complejo aparecen recogidos en la figura 53; la figura 54 los recoge para el caso del modelo simplificado de la sala. En ambas figuras se observa que los resultados obtenidos quedan bien lejos del ideal, por lo que la claridad no es un parámetro adecuado para validar los modelos.

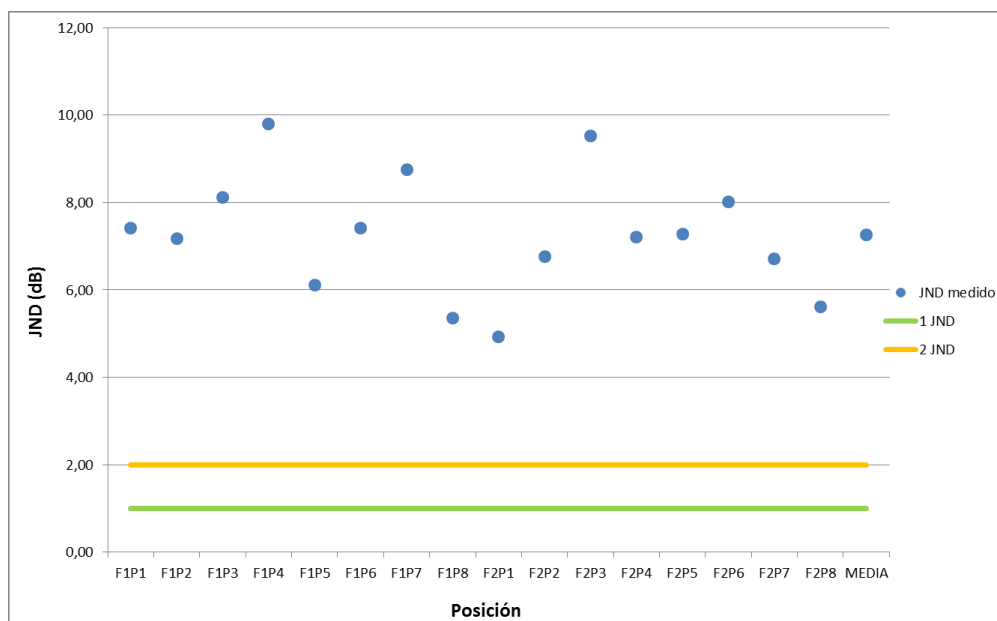


Figura 53: JND para el C80 de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio

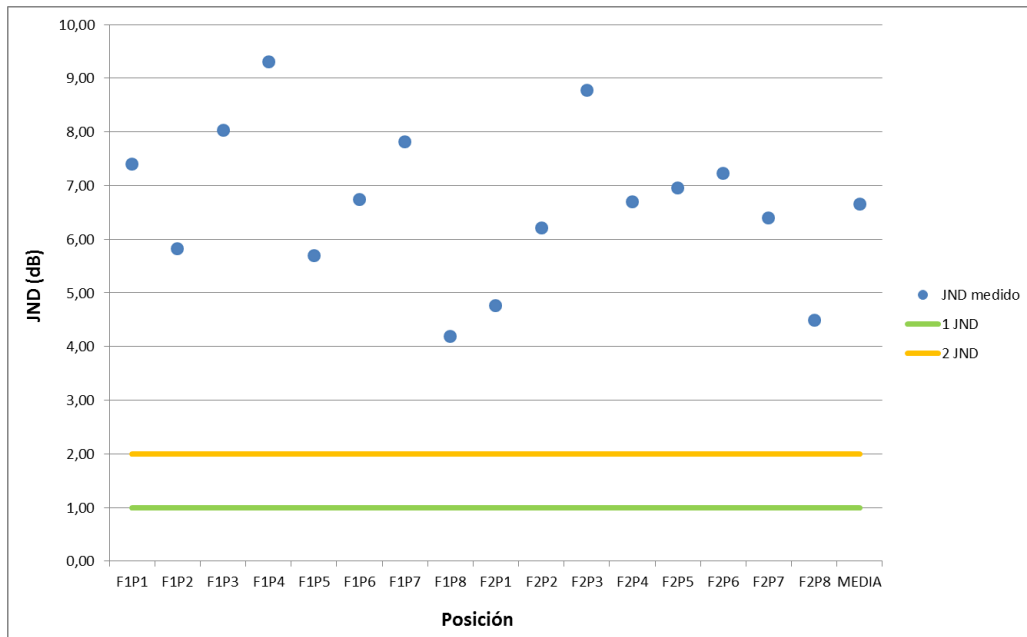


Figura 54: JND para el C80 de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio

5. D50

En este caso, el JND se define en las mismas bandas de frecuencia que en los parámetros anteriores y toma un valor de 0.05.

De nuevo se calcula la media de las bandas de 500 y 1000 Hz y se calcula el JND para cada posición de medida, así como para la media en esta banda calculada. En la figura 54 se observan los resultados para la simulación del modelo la sala complejo y en la 55, los correspondientes al modelo más simple.

En el caso de la figura 55, se ve claramente como la mayoría de valores entran en los considerados límites aceptables aunque haya 5 posiciones en las que el JND es ligeramente superior a lo que debería, pero en ningún caso se supera el valor 0.12 por lo que se podría decir que el modelo complejo puede validarse utilizando la definición ya que los pocos puntos que quedan fuera de dos JND están bastante cerca del límite.

En cuanto a la figura 56, absolutamente todos los valores entran en 2 JND, por lo que el modelo simplificado de la sala queda validado.

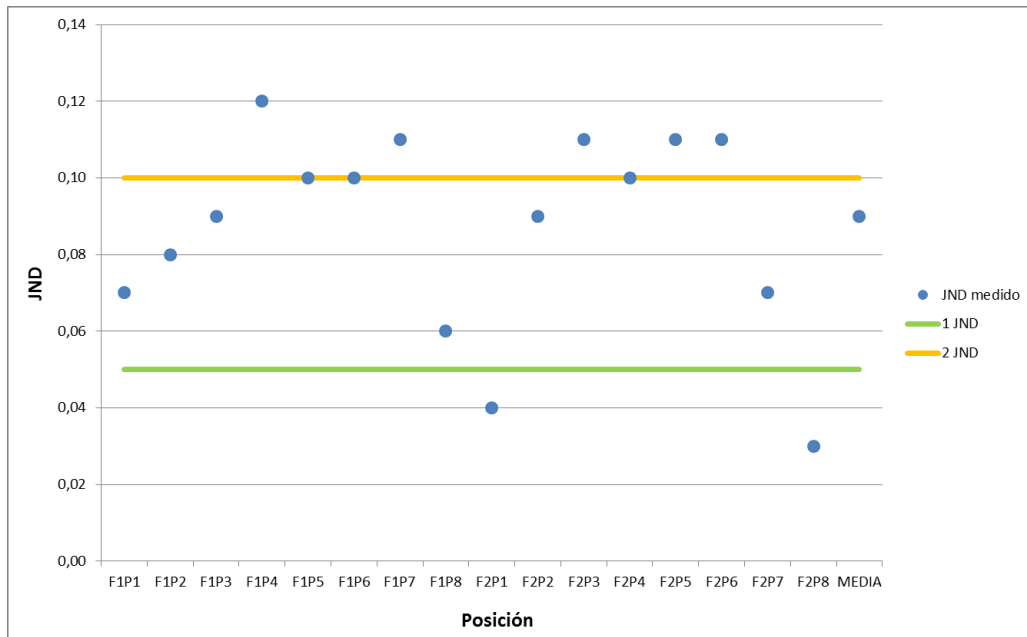


Figura 55: JND para el D50 de las medidas de la simulación compleja punto a punto y para su valor medio

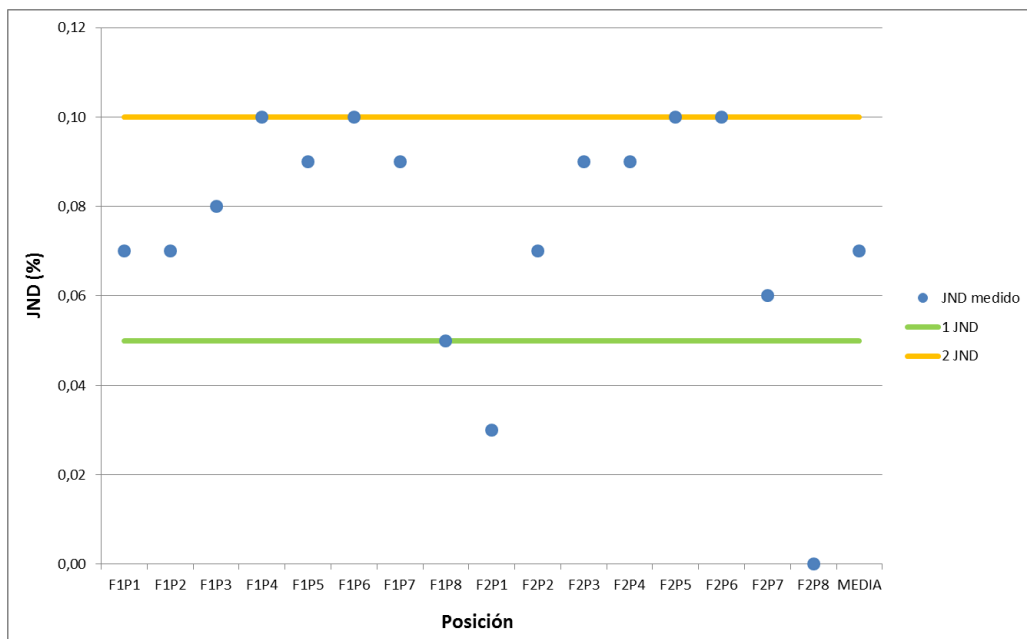


Figura 56: JND para el D50 de las medidas de la simulación simple punto a punto y para su valor medio

En resumen, se puede concluir que, al igual que el tiempo central, la definición puede utilizarse para validar los modelos virtuales creados, pero si se comparan los valores que toman los JND de ambos parámetros, es evidente que el tiempo central cumple mejor este cometido.

6. %Alcons

Como se explicó en el capítulo 1, el Alcons sólo está definido para la banda de tercio de octava centrada en 2 kHz, por tanto, no es apropiado calcular su JND. En cambio, como se comentó en el mismo capítulo, ya existen unos valores aceptados para saber si la inteligibilidad de la palabra; por tanto, este parámetro se utilizará para conocer si se entenderán los mensajes orales en las salas diseñadas o no. Posteriormente, se compararán estos valores con los medidos in-situ para ver si existen diferencias o no.

En la figura 57 se muestra el Alcons medido en la simulación del modelo complejo de la sala y en la figura 58, el medido en el modelo simplificado.

En primer lugar se observa que ambas gráficas son muy similares tomando ambas aproximadamente la misma forma. Esto vuelve a indicar que el modelo simplificado de la sala hace las mismas funciones que el complejo.

Por otro lado, ambos casos arrojan resultados en los que el Alcons toma un valor muy bajo, por debajo del 5% por lo que la inteligibilidad en las salas diseñadas será muy buena según este parámetro.

Por último, se aprecia que el Alcons del modelo simplificado es, aunque por poco, ligeramente mejor que el del modelo complejo; este hecho de nuevo insta a que no sólo se puede utilizar el modelo más simple en lugar del complejo, sino que será mejor utilizarlo ya que los datos obtenidos en general son iguales o mejores que los correspondientes al modelo complejo.

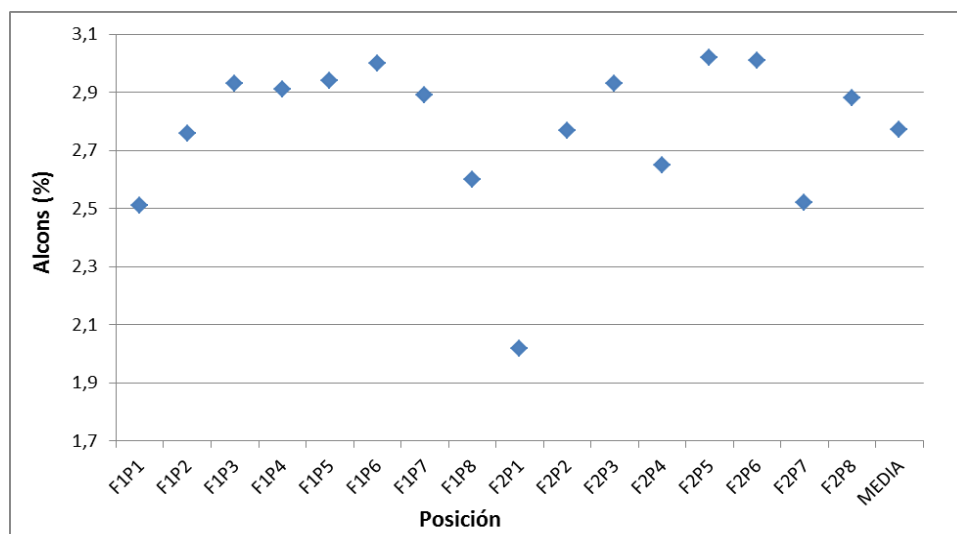


Figura 57: Alcons medido en cada una de las posiciones del modelo complejo de la sala

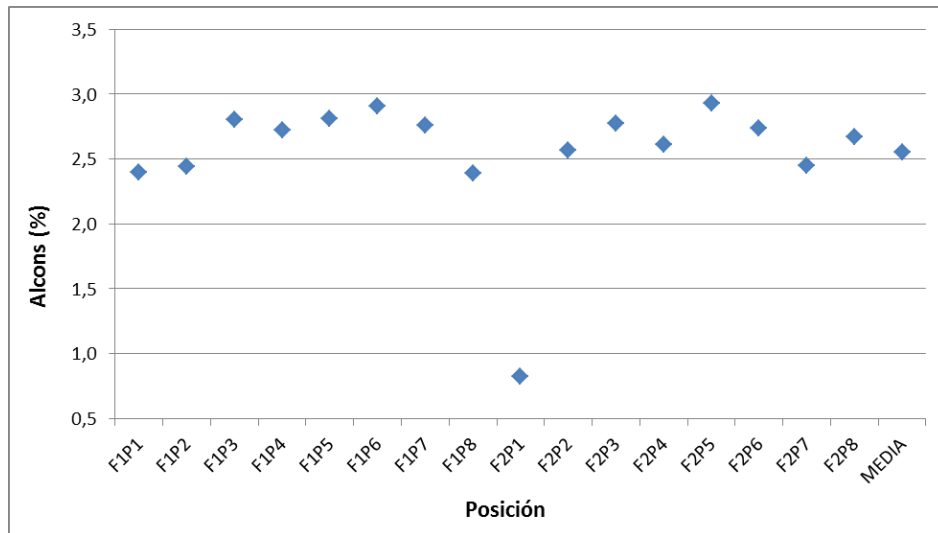


Figura 58: Alcons medido en cada una de las posiciones del modelo simplificado de la sala

7. STI

Para estudiar el STI, se sigue el mismo proceso que el utilizado en el caso del Alcons. En la figura 59 se representa el STI correspondiente a la simulación en la sala compleja y en la 60 lo mismo pero para la sala simplificada.

Tal como ocurría con el Alcons, ambas gráficas quedan muy similares ya que como se ha comprobado en diversas ocasiones, se pueden utilizar indistintamente ambos modelos.

En el caso de la figura 59, se observa que la gran mayoría de valores son superiores a 0.75 con lo que quedan incluidos dentro de la zona de valores excelentes del STI de la escala mostrada en la figura 5. Los pocos valores que quedan por debajo de 0.75 quedan incluidos en la zona de valores muy buenos, por lo que la inteligibilidad de la sala compleja modelada será muy buena.

En cuanto a la figura 60, todos los valores calculados se pueden considerar como excelentes por lo que la inteligibilidad de este modelo simplificado será incluso mejor que la de la sala modelada con más detalle.

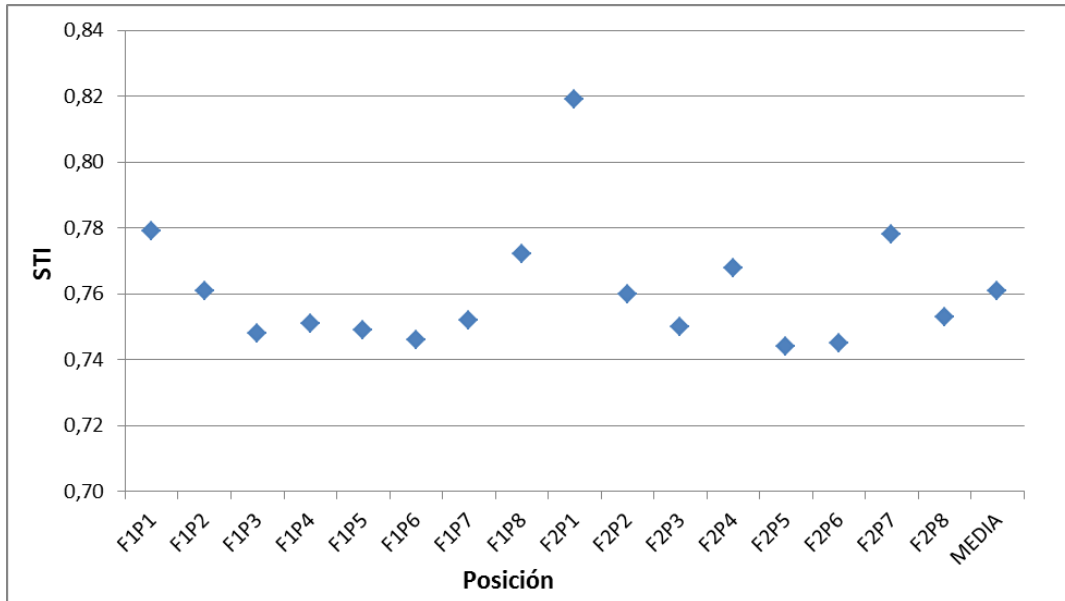


Figura 59: STI medido en cada una de las posiciones del modelo complejo de la sala

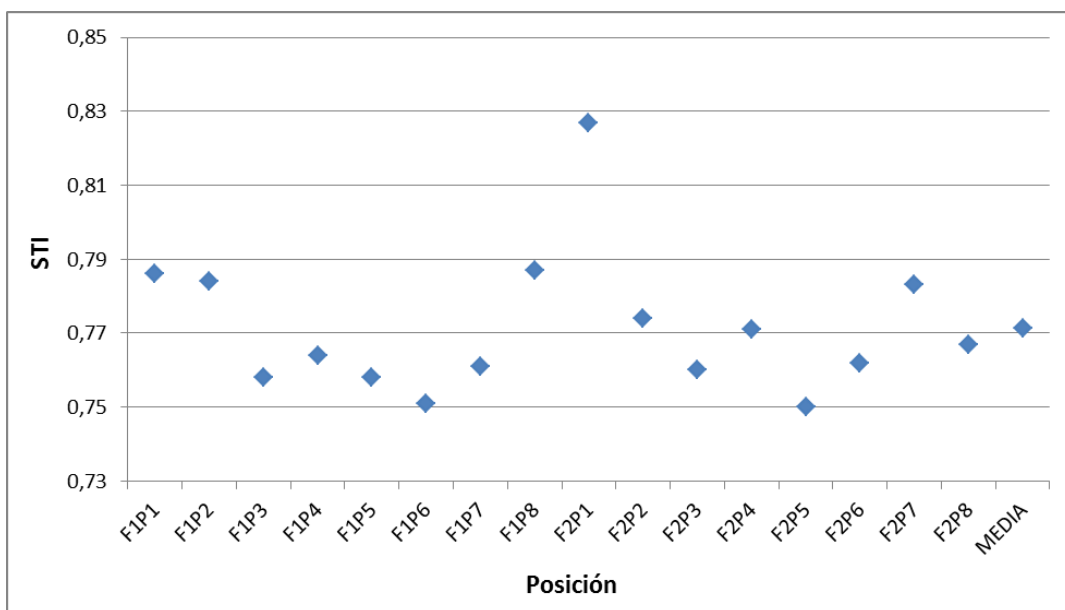


Figura 60: STI medido en cada una de las posiciones del modelo complejo de la sala

7.1. *RaSTI*

Como se comentó en el capítulo 1, el RaSTI es una versión simplificada del STI. A modo de ejemplo, se calcula el RaSTI medio para ambos modelos de la sala diseñados. Para ello, se utiliza la ecuación 9 introduciendo en ella los valores de Alcons medios calculados anteriormente. En la figura 61 se aprecia la comparación entre los STI medidos en las simulaciones y los RaSTI calculados; en ambos casos se cumple que, como se esperaba, el RaSTI tiene unos valores casi idénticos a los del STI y se ve

fácilmente que la inteligibilidad del modelo simplificado es algo mejor que la del modelo detallado.

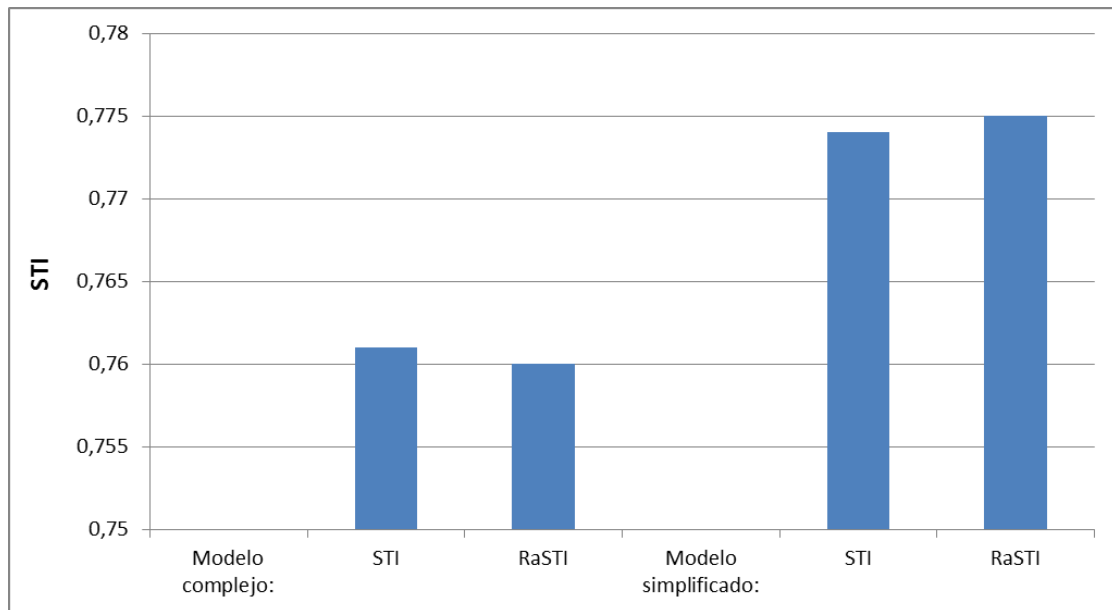


Figura 61: Comparación entre los STI y los RaSTI medios para ambos modelos

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Existen multitud de parámetros acústicos que se pueden medir en la sala de cine. El que más información da sobre la sala es el tiempo de reverberación el cual se puede estimar fácilmente a partir de medidas parciales como el T30. Por este motivo, a la hora de realizar un modelo virtual de la sala, este es el parámetro mediante el que se realizan los ajustes para que el modelo se corresponda con la sala real.

A la hora de realizar medidas en la sala, se han utilizado dos señales; una de tipo MLS y otra de barrido sinusoidal. Con ambas señales se obtienen datos válidos con un INR superior al límite establecido. No obstante, en el caso de las medidas con señal MLS, el INR obtenido tiene un nivel más bajo, es algo irregular y a medida que se separan los micrófonos de las fuentes, se acerca demasiado al límite. Además, se comprueba que las medidas del tiempo de reverberación realizadas a partir de la señal MLS tienen peor calidad que las realizadas con la señal de barrido sinusoidal. Por tanto, se decide no utilizar los datos obtenidos a partir de una señal MLS ya que se consideran poco fiables y se recomienda que en futuras ocasiones sólo se realicen medidas con la señal de barrido sinusoidal.

En este proyecto se han realizado dos modelos distintos de la sala. La primera de las opciones es un modelo lo más detallado y fiel, en la medida de lo posible, a la geometría de la sala original, mientras que la segunda opción es un modelo más simple en el que no se representan detalles como los escalones de la zona de audiencia, siendo estos sustituidos por una simple rampa. Como conclusión principal, se ha demostrado que ambos modelos arrojan unos resultados similares, de hecho, el modelo simplificado consigue en muchas ocasiones resultados ligeramente mejores. Por tanto, se recomienda que en futuras ocasiones se realice un modelo de la sala lo más simple posible, siendo siempre fiel a la realidad, ya que supondrá un ahorro importante de trabajo y tiempo, tanto en el diseño, como a la hora de realizar simulaciones con él, obteniendo finalmente resultados incluso mejores que si se detalla demasiado el modelo, ya con los detalles, se aumenta el número de superficies en los cálculos y EASE responde peor a la hora de simular.

En cuanto a la configuración de las simulaciones en EASE, se recomienda que siempre que se disponga de un equipo lo suficientemente potente, se elija una resolución intermedia y dividiendo el cálculo en varios hilos, ya que así se consiguen resultados de buena calidad ahorrando bastante tiempo.

Para validar los modelos creados, la mejor forma es utilizar el JND. Tras realizar las comprobaciones oportunas, se ha determinado que los parámetros acústicos que se deben usar para validar los modelos son la definición y el tiempo central, en especial, el segundo de ellos ya que con ellos se obtienen diferencias casi inapreciables respecto a las medidas reales. Se recomienda por tanto, que en futuras mediciones se preste especial atención a estos dos parámetros respecto a los demás para así poder determinar si los parámetros con los que se deben validar los modelos virtuales son siempre esos dos, o si por el contrario sólo validan la sala estudiada en este proyecto. Se propone en este sentido la creación de un macro en Excel o un pequeño programa que permita extraer y analizar los datos medidos rápidamente, ya que, aunque es un proceso sencillo, es muy lento y repetitivo realizarlo a mano.

Por otro lado, se propone que en futuras medidas se realicen simulaciones utilizando un modelo de la fuente utilizada en las medidas in-situ, para así comprobar si se han cometido grandes errores al utilizar la fuente omnidireccional *Sphere* que incluye EASE.

Igualmente, sería interesante realizar los mismos cálculos llevados a cabo en este proyecto, pero usando el sistema de refuerzo sonoro presente en la sala para ver cómo se comporta.

En resumen, a lo largo de este proyecto, se ha aprendido a realizar medidas en un entorno real ajustándose a las directivas expuestas en la normativa vigente. Además, se ha indagado en el uso de EASE, aprendiendo a utilizar todas sus características referentes a la creación de recintos e investigando las distintas opciones que tiene a la hora de simular. Por último, se ha aprendido a estudiar los distintos parámetros acústicos a partir del JND pudiendo utilizar los resultados para validar modelos virtuales creados.

Referencias

- [1] ACÚSTICA WEB – Tiempo de reverberación. David Casadevall.
<http://www.acusticaweb.com/teoria-acustica/blog/teoracca/tiempo-de-reverberaci.html>
- [2] ARQUISON. <http://www.arquison.com/estudio.htm>
- [3] WIKIPEDIA – Early Decay Time:
http://es.wikipedia.org/wiki/Early_decay_time
- [4] LEÓN RODRÍGUEZ, Ángel Luis; SENDRA SALAS, Juan José; NAVARRO CASAS, Jaime; ZAMARREÑO GARCÍA, Teófilo. Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía. Universidad de Sevilla, 2007.
- [5] CARRIÓN ISBERT, Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Ediciones UPC. Barcelona, 1998.
- [6] KINÉPOLIS EMPRESAS: <http://www.kinepolisempresas.com>
- [7] KINÉPOLIS MADRID: <http://kinepolis.es/cines/kinepolis-madrid-ciudad-de-la-imagen>
- [8] Asociación Española de Normalización y Certificación. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos. UNE ISO 3382-1. Madrid : AENOR, 2010
- [9] Asociación Española de Normalización y Certificación. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. UNE ISO 3382-2. Madrid: AENOR, 2008
- [10] ÁLAVA INGENIEROS: <http://www.alava-ing.es>
- [11] AKG: <http://www.akg.com>
- [12] CURSO DE MANEJO DE 2260 INVESTIGATOR.
- [13] LÓPEZ RODRÍGUEZ, Joaquín. Fundamentos básicos de metrología dimensional. Universidad politécnica de Cartagena, ETSII, 2011.
<http://hdl.handle.net/10317/1614>
- [14] EASE 4.3 USER'S GUIDE & TUTORIAL: http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/EASE/EASE_4.3_Tutorial_EnglisE.pdf

Bibliografía

- MORENO GÁLVEZ, Francisco José. Estudio acústico y simulación del acondicionamiento del local de conciertos de la Unión Musical de Higuieruelas. Dirigido por Francisco Javier Redondo Pastor y Juan Antonio Martínez Mora. Trabajo final de carrera. Universidad Politécnica de Valencia, EPSG, 2011.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, Sara. Estudio acústico de la remodelación del salón de actos de la EUITT. Dirigido por Juan José Gómez Alfageme. Trabajo fin de máster. Universidad Politécnica de Madrid, EUITT, 2012.
- SARMIENTO SALGADO, Ana Belén. Validación de software para la predicción de acústica de salas y aplicación al diseño de aulas. Dirigido por Manuel Sobreira Seoane. Proyecto final de carrera. Universidad de Vigo, ETSIT, 2003.
- RECUERO LÓPEZ, M. Acústica arquitectónica. Ed. Paraninfo. Madrid 1999.
- RECUERO LÓPEZ, M. Ingeniería acústica. Ed. Paraninfo. Madrid 2000.
- SAN MARTÍN, Juan Eugenio. Acústica arquitectónica para salas de grabación. Seminario.
- PUREBITS.COM – Acoustical Parameters Measurement <http://www.purebits.com/appnote11.html#par4>
- SYNAUDCON - Early Decay Time as a System Performance Benchmark: <http://www.synaudcon.com/site/author/pat-brown/early-decay-time-as-a-system-performance-benchmark/>